ANSYS Workbench 工程应用案例精通

陈艳霞　陈　磊　编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以 ANSYS 公司最新版本的有限元分析平台 Workbench 14.0 软件为操作平台，详细介绍了该软件的新功能与应用，包括软件模块的组成、常用模块的基本应用等。

全书以各个分析模块为基础，介绍 ANSYS Workbench 14.0 的建模、网格划分与常见 CAD 软件集成等内容，并以项目范例为指导，主要讲解 Workbench 在静力学分析、动力学分析、热力学分析、流体力学分析及多物理场电磁耦合分析中的电磁分析等应用，其中，电磁分析模块是 ANSYS Workbench 14.0 软件新集成的分析模块。

本书内容丰富，涉及领域范围广，使读者在掌握软件操作的同时，也能掌握相关工程领域实际问题的分析思路、方法和经验，并能自如地解决本领域所出现的问题。

本书适合理工类院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师使用，同时可作为相关工程技术人员的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS Workbench 工程应用案例精通 / 陈艳霞，陈磊编著.—北京：电子工业出版社，2012.8

ISBN 978-7-121-17690-6

I. A… Ⅱ. ①陈… ②陈… Ⅲ. ①有限元分析－应用程序 Ⅳ. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 164053 号

策划编辑：许存权
责任编辑：许存权　　特约编辑：刘海霞　王　燕
印　　刷：
装　　订：
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编 100036
开　　本：787×1 092　1/16　印张：26.25　字数：670 千字
印　　次：2012 年 8 月第 1 次印刷
印　　数：4 000 册　定价：59.00 元（含 DVD 光盘 1 张）

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前　言

随着现代化技术的突飞猛进，借助先进的计算机辅助工程技术和手段以提升产品研发、设计、制造能力，保持市场竞争优势势在必行。工程界对以有限元技术为主的 CAE 技术的认识不断提高，CAE 技术越来越得到了重视，各行各业纷纷引进先进的 CAE 软件，用于提升其产品的研发水平。

自 20 世纪 90 年代开始，商业化的 CAE 软件进入中国市场以来，在很长一段时间内，国内用户对 CAE 的认识还不够，随着国内 CAE 软件技术应用的普及，用户对 CAE 的认识越来越成熟，需求也越来越理性化，对于 CAE 软件的要求总体呈现出以下几方面的趋势：

- 直观友好的用户界面。
- 方便强大的前后处理功能。
- 广泛而强大的求解功能。

ANSYS Workbench 软件就是在这种背景下诞生的有限元分析软件，经过几年的发展，现已经成为功能强大、应用领域广的多物理场电磁耦合软件。目前，ANSYS 公司的最新版 Workbench 14.0 所提供的 CAD 双向参数链接互动、项目数据自动更新、全面的参数管理、无缝集成的优化设计工具等，使其在仿真驱动产品设计方面达到了前所未有的高度。同时，ANSYS Workbench 14.0 具有强大结构、流体、热、电磁及其相互耦合分析的功能。

作为业界最领先的工程仿真技术集成平台，Workbench 14.0 提供了全新的“项目视图”功能，将整个仿真流程更加紧密地组合在一起，通过简单的拖曳操作即可完成复杂的多物理场分析流程。

本书在必要的理论概述的基础上，通过大量的典型案例对 ANSYS Workbench 分析平台中的模块进行详细介绍，并结合实际工程与生活中的常见问题进行详细讲解，全书内容简洁，给人耳目一新的感觉。

全书共分为 15 章，各章具体内容简单介绍如下。

第 1 章：详细介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件的模块与相关设置，同时针对几何建模模块 DesignModeler 平台的建模功能与网格划分模块 Mechanical 平台的网格划分工具进行详细讲解，另外，还对 ANSYS Workbench 14.0 软件的其他网格划分模块进行了简单介绍。

第 2 章：通过四个不同类型的案例对 ANSYS Workbench 14.0 软件的结构静力分析模块进行详细介绍，案例涉及梁单元、实体单元及复杂曲面实体单元的基础静力分析。

第 3 章：通过三个典型的案例对普通模态及含有预应力的模态进行详细的分析，帮助读者掌握 Workbench 在模态分析中的应用方法。

第 4 章：通过三个典型的谐响应分析案例帮助读者掌握 Workbench 在谐响应分析中的应用方法。

第 5 章：通过两个典型的案例对响应谱进行分析，帮助读者掌握 Workbench 在响应谱分析中的应用方法。

第 6 章：通过两个典型的瞬态动力学分析案例帮助读者掌握 Workbench 在瞬态动力学分析中的应用方法。

第 7 章：通过两个典型的随机振动分析案例帮助读者掌握 Workbench 在随机振动分析中的应用方法。

第 8 章：通过两个典型的显示动力学分析案例帮助读者掌握 Workbench 在显示动力学分析中的应用方法，同时还简单介绍了使用 LS-DYNA 程序包进行分析的前处理。

第 9 章：通过一个典型的非线性分析中的接触非线性分析案例帮助读者掌握 Workbench 在非线性分析中的应用方法。

第 10 章：通过两个典型的装配体案例，介绍了接触分析的设置方法与分析过程，帮助读者掌握 Workbench 在接触分析中的应用方法。

第 11 章：通过三个典型的线性屈曲分析案例帮助读者掌握 Workbench 在线性屈曲分析中的应用方法。

第 12 章：通过两个典型的案例对静态与瞬态热力学进行详细的分析，帮助读者掌握 Workbench 在热力学分析中的应用方法，同时也简单介绍了热结构耦合分析的操作过程。

第 13 章：通过一个典型的疲劳分析案例帮助读者掌握 Workbench 在疲劳分析中的应用方法。

第 14 章：通过两个典型的案例分别介绍了 ANSYS CFX 软件的内流场与外流场的有限元分析与操作方法，帮助读者掌握 Workbench 在瞬态动力学分析中的应用方法。

第 15 章：通过两个典型案例详细介绍了 ANSYS Workbench 软件中的 Maxwell 模块的电磁场建模与电磁结构静力耦合分析过程，在进行本章学习之前，需要单独安装 ANSOFT Maxwell 软件。

本书内容丰富、结构清晰，所有案例均经过精心设计与筛选，代表性强，并且每个案例都通过用户图形交互界面进行全过程操作，向读者进行详细介绍。同时作者紧跟 ANSYS 软件发展最前沿，对目前最新版 ANSYS Workbench 14.0 软件的部分新功能进行了简单介绍与案例分析，希望对渴望入门的读者及部分高级读者有所帮助。

本书由陈艳霞、陈磊编著，另外，杨海龙、陆小成、李诗洋、宋吉伟、王存江、李秀峰、沈清华、周晓飞、国大鹏、陈晓东、张向东、唐家鹏、丁金滨等也参与了部分章节的编写工作。由于作者水平有限，编写时间较短，书中欠妥、错误之处在所难免，希望读者和同仁能够及时指出，共同提高。

读者在学习过程中遇到难以解答的问题，可以到为本书专门提供服务的“中国 CAX 联盟”网站 www.ourcax.com 求助，或直接发邮件到作者邮箱 comshu@126.com，作者会尽快给予解答。

作者

目　录

第 1 章　ANSYS Workbench 14.0 概述……（1）
1.1　ANSYS 软件简介……（1）
1.2　ANSYS Workbench 14.0 模块……（3）
1.3　ANSYS Workbench 14.0 与 Pro/E（Creo）软件集成设置……（4）
1.4　ANSYS Workbench 14.0 几何建模……（7）
1.5　ANSYS Workbench 14.0 网格划分工具……（30）
1.6　ANSYS Workbench 14.0 其他网格划分工具……（45）
1.7　本章小结……（48）
第 2 章　结构静力学分析及实例详解……（49）
2.1　线性静力分析简介……（49）
2.2　项目案例 1——实体静力分析……（51）
2.3　项目案例 2——梁单元线性静力分析……（60）
2.4　项目案例 3——曲面实体静力分析……（74）
2.5　项目案例 4——支承座静态结构分析……（83）
2.6　本章小结……（94）
第 3 章　模态分析及实例详解……（95）
3.1　模态分析简介……（95）
3.2　项目案例 1——机箱模态分析……（97）
3.3　项目案例 2——有预应力模态分析……（105）
3.4　项目案例 3——制动鼓模态分析……（115）
3.5　本章小结……（123）
第 4 章　谐响应分析及实例详解……（124）
4.1　谐响应分析简介……（124）
4.2　项目案例 1——机箱谐响应分析……（125）
4.3　项目案例 2——齿轮箱谐响应分析……（131）
4.4　项目案例 3——丝杆谐响应分析……（143）
4.5　本章小结……（151）
第 5 章　响应谱分析及实例详解……（152）
5.1　响应谱分析简介……（152）
5.2　项目案例 1——塔架响应谱分析……（153）
5.3　项目案例 2——计算机机箱响应谱分析……（164）
5.4　本章小结……（169）
第 6 章　瞬态动力学分析及实例详解……（170）
6.1　瞬态动力学分析简介……（170）
6.2　项目案例 1——实体梁瞬态动力学分析……（171）
6.3　项目案例 2——弹簧瞬态动力学分析……（186）
6.4　本章小结……（198）
第 7 章　随机振动分析及实例详解……（199）
7.1　随机振动分析简介……（199）
7.2　项目案例 1——随机振动学分析……（199）
7.3　项目案例 2——弹簧随机振动分析……（209）
7.4　本章小结……（219）
第 8 章　显示动力学分析及实例详解……（220）
8.1　显示动力学分析简介……（220）
8.2　项目案例 1——钢钉受力显示动力学分析……（222）
8.3　项目案例 2——钢板成型显示动力学分析……（234）
8.4　本章小结……（246）
第 9 章　结构非线性分析及实例详解……（247）
9.1　结构非线性分析简介……（247）
9.2　项目案例——接触大变形分析……（249）
9.3　本章小结……（258）

第 10 章　接触分析及实例详解 …… （259）
10.1　接触分析简介 …… （259）
10.2　项目案例 1——虎钳接触分析 …… （260）
10.3　项目案例 2——装配体接触分析 …… （271）
10.4　本章小结 …… （283）
第 11 章　线性屈曲分析及实例详解…… （284）
11.1　线性屈曲分析简介…… （284）
11.2　项目案例 1——钢管屈曲分析 …… （285）
11.3　项目案例 2——金属容器屈曲分析 …… （298）
11.4　项目案例 3——工字梁屈曲分析 …… （310）
11.5　本章小结 …… （321）
第 12 章　热力学分析及实例详解 …… （322）
12.1　热力学分析简介…… （322）
12.2　项目案例 1——稳态热分析实例 …… （324）
12.3　项目案例 2——杯子瞬态热学分析 …… （333）
12.4　本章小结 …… （335）
第 13 章　疲劳分析及实例详解 …… （336）
13.1　疲劳分析简介…… （336）
13.2　项目案例——椅子疲劳分析… （338）
13.3　本章小结 …… （343）
第 14 章　流体动力学分析及实例详解… （345）
14.1　流体动力学分析简介 …… （345）
14.1.1　流体动力学分析…… （345）
14.1.2　基本控制方程…… （348）
14.2　项目案例 1——三通流体动力学分析 …… （351）
14.3　项目案例 2——叶轮外流场分析 …… （362）
14.4　本章小结 …… （378）
第 15 章　Workbench 耦合场分析及实例详解…… （379）
15.1　多物理场耦合分析简介 …… （379）
15.2　项目案例 1——四分裂导线电磁结构耦合分析…… （380）
15.3　项目案例 2——螺线管电磁结构耦合分析…… （398）
15.4　本章小结 …… （414）

第 1 章

ANSYS Workbench 14.0 概述

本章从总体上对 ANSYS Workbench 软件功能进行概述，同时对 ANSYS Workbench 14.0 软件的新功能进行简单介绍，包括结构力学模块、流体力学模块，同时还介绍了 ANSOFT 公司的 Maxwell 模块与 RMPRT 模块。

以 Pro/E（Creo）软件为例，本章对常见的 CAD 软件集成设置进行了详细的讲解，同时对常见 CAD 软件不具备的功能进行详细介绍，并增加了相关案例的分析与操作步骤的详解。

本章对在 DesignModeler 平台上的几何建模进行阐述与案例操作详解，同时对 Mechanical 平台的几何网格划分进行详细介绍。

学习目标：

（1）了解 ANSYS Workbench 软件分析功能。

（2）掌握 ANSYS Workbench 软件与 CAD 软件的集成设置方法。

（3）掌握在 DesignModeler 平台上进行简单几何建模的方法。

（4）掌握在 Mechanical 平台上进行几何模型网格划分与相关网格划分设置的方法。

（5）了解 ANSYS Workbench 14.0 其他几何模型划分软件。

1.1 ANSYS 软件简介

ANSYS 提供广泛的工程仿真解决方案，这些方案可以对设计过程要求的任何场进行工程虚拟仿真。全球的组织都相信 ANSYS 会为工程仿真软件投资带来最好的价值。

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。它由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发，能与多数 CAD 软件接口，实现数据的共享和交换。

软件主要包括三个部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

（1）前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，可以方便地构造有限元模型。

（2）分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力。

（3）后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也

可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

ANSYS 特色功能：

（1）前后处理。

- 双向参数互动的 CAD 接口。
- 智能网格生成器。
- 各种结果的数据处理。
- 各种结果的图形及动画显示。
- 全自动生成计算报告。

（2）结构静力分析（线性/非线性）。

（3）迭层复合材料（非线性迭层壳单元、高阶迭层实体单元、Tsai-Wu 失效准则、图形化）。

- 非线性分析能力。
- 几何非线性（大变形、大应变、应力强化、旋转软化、压力载荷强化）。
- 材料非线性（近 70 种非线性材料本构模型，含弹塑性、蠕变、黏塑性、黏弹性、超弹性、非线性弹性、岩土和混凝土、膨胀材料、垫片材料、铸铁材料等）。
- 单元（或称边界/状态）非线性。
- 高级接触单元（点对点接触、点对面接触、刚对柔面面接触、柔对柔面面接触、线性接触（MPC）等，支持大滑移和多种摩擦模型，支持多场耦合接触）。

（4）其他非线性单元（旋转铰接单元、弹簧－阻尼器单元、膜壳单元等）。

（5）动力学分析能力。

- 模态分析（自然模态分析、预应力模态分析、循环对称模态、阻尼复模态、模态综合分析）。
- 谐响应分析。
- 瞬态分析（线性/非线性、多种算法）。
- 响应谱和随机振动分析（单点谱、多点谱、功率谱）。
- 转子动力学分析。

（6）屈曲分析（线性屈曲、非线性屈曲、循环对称屈曲分析）。

（7）高级对称分析（循环对称模态分析、循环对称结构静力分析、轴对称、平面对称和反对称）。

（8）断裂力学分析（应力强度因子、J 积分、裂纹尖端能量释放率）。

（9）通用疲劳分析。

（10）结构热分析部分（Professional）。

- 稳态温度场（热传导、热对流、热辐射）。
- 瞬态温度场（热传导、热对流、热辐射、相变）。
- 管流热耦合。
- 支持复杂热载荷和边界条件。
- 非线性特性（接触传热、非线性材料）。

（11）耦合场分析部分及其他功能。

- 静流体分析（流固耦合静动力分析）。

- 声学分析（声波在各种声学介质中的传播、声波的反射和吸收（远场））。
- 耦合场分析。

（12）设计优化：多种优化算法、多种辅助工具。

（13）拓扑优化：拓扑形状优化、拓扑频率优化。

（14）概率设计系统（PDS）。

- 十种概率输入参数。
- 参数的相关性。
- 两种概率计算方法：蒙特卡罗法、响应面法。
- 支持分布式并行计算。
- 可视化概率设计结果。

（15）其他实用技术。

- P 单元、子结构、子模型分析技术。
- 单元生死分析技术。
- 专用单元（螺栓单元、真实截面梁单元、表面效应单元、轴对称谐波单元等）。

（16）二次开发特征。

- ANSYS 参数化设计语言（APDL）。
- 用户可编程特性（UPF）。
- 用户界面设计语言（UIDL）。
- 专用界面开发工具（TCL/TK）。
- 外部命令。

（17）求解器：直接求解器、多种迭代求解器、特征值求解器。

（18）并行求解器。

- 分布式 ANSYS 求解器：包括两个稀疏矩阵求解器（Sparse 和 Distributed Sparse 直接求解器）、一个 PCG 求解器和一个 JCG 求解器。
- 代数多重网格求解器 AMG：支持多达 8 个 CPU 的共享式并行机（CPU 每增加一倍，求解速度提高 80%，对病态矩阵的处理性能优越）。

ANSYS 14.0 包含大量全新的高级特性，为客户提供强化复杂工程仿真解决方案，并革新驱动高性能计算运作（HPC）。

（1）继续开发和提供世界一流的求解器技术。

（2）提供了针对复杂仿真的多物理场耦合解决方法。

（3）整合了 ANSYS 的网格技术并产生统一的网格环境。

（4）通过对先进的软硬件平台的支持来实现对大规模问题的高效求解。

（5）继续改进最好的 CAE 集成环境——ANSYS Workbench。

（6）继续融合先进的计算流体动力学技术。

1.2 ANSYS Workbench 14.0 模块

ANSYS Workbench 14.0 交互界面是利用 ANSYS 14 作为求解器求解问题的产品，新

版本的 Workbench 环境为用户提供以下的集成仿真计算平台。

- Mechanical：网格划分及结构热力学分析。
- Fluid Flow（CFX）：用 CFX 进行流体动力学分析。
- Fluid Flow（FLUENT）：用 FLUENT 进行流体动力学分析。
- Electric：电场分析。
- Magnetostatic：静态磁场分析。
- IC Engine：引擎有限元分析。

以上仅列出了 Workbench 部分模块的求解功能，除此之外，自 ANSYS 宣布收购了世界上最大的 EDA 公司——ANSOFT 公司以来，已经成功实现包括电磁仿真在内的多物理场仿真。

随着电力电子系统越来越多地应用于汽车、航天、工业和消费品，工程师必须考虑电路在抗振、发热和电磁干扰等各方面的性能，面对这些复杂系统的各种问题，ANSYS 提供了既有深度又有广度的解决方案。

在最新的 Workbench 14.0 版本中，ANSOFT 系列软件已经完全整合到 ANSYS Workbench 14.0 的仿真平台中。

如图 1-1 所示为集成了 ANSOFT 公司的 Maxwell 15.0 电磁分析模块的 Workbench 工具箱。

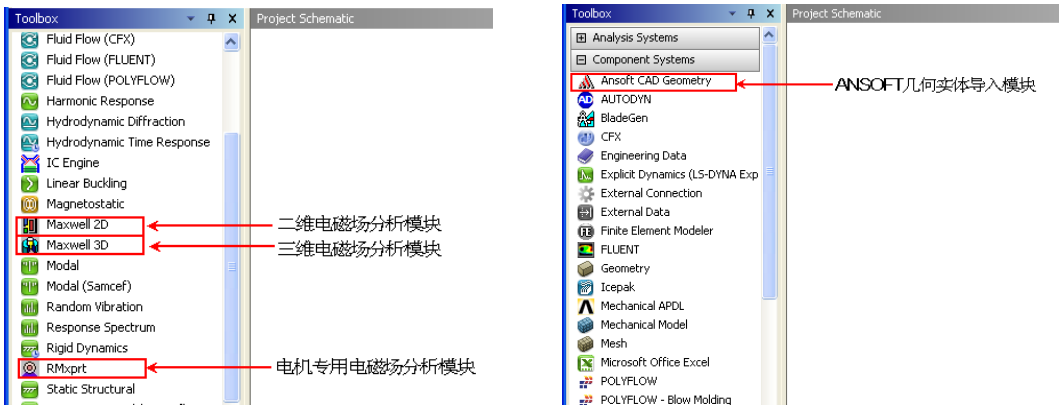


图 1-1　Workbench 工具箱

1.3 ANSYS Workbench 14.0 与 Pro/E（Creo）软件集成设置

ANSYS Workbench 14.0 软件能与大多数 CAD 软件实现数据共享和交换，如 PTC 公司的 PRO/E（CREO）、Siemens PLM Software 公司的 UG 和 Solidedge、AUTO DESK 公司的 AUTO CAD 和 Inventor、Dassault Systemes 公司的 CATIA 和 Solidworks 等。

除此之外，ANSYS Workbench 14.0 还能与主流的 CAE 软件进行数据交换，如 ABAQUS、NX、NASTRAN、I-DEAS 及 ALGOR 等。

ANSYS Workbench 14.0 仍旧支持第三方数据格式的导入功能，第三方模型的格式有 ACIS（SAT）、IGS/IGES、x_t/x_b 等。

下面简要介绍一下 ANSYS Workbench 14.0 与 PRO/E（CREO）软件集成的设置方法。

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Utilities →CAD Configuration Manager 14.0 命令。

启动如图 1-2 所示的 ANSYS CAD Configuration Manager 14.0 软件设置窗口，在窗口的 CAD Selection 选项卡中，会看到 ANSYS Workbench 14.0 软件能与大多数主流 CAD 软件实现集成。

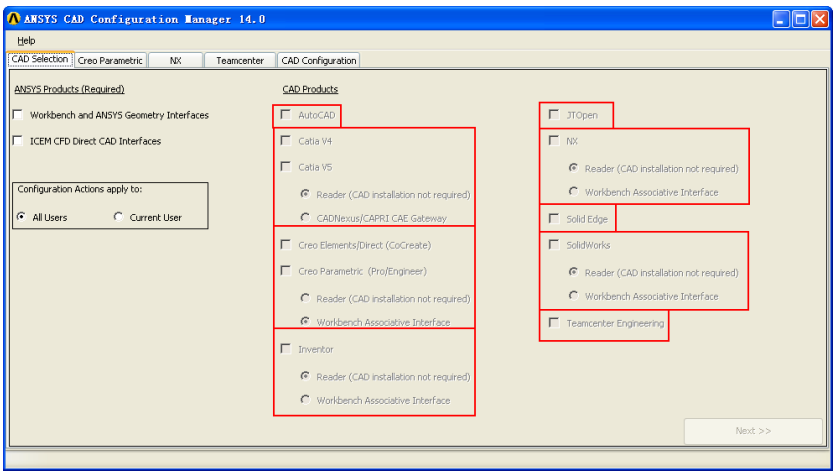


图 1-2　启动 ANSYS CAD Configuration Manager 14.0 软件设置窗口

Step2：在如图 1-3 所示的 CAD Selection 选项卡中依次选择 Workbench and ANSYS Geometry Interface 及 Creo Parametric（Pro/Engineer）选项，使其前面的☐变成☑，并单击 Next>>按钮，进入下一步设置。

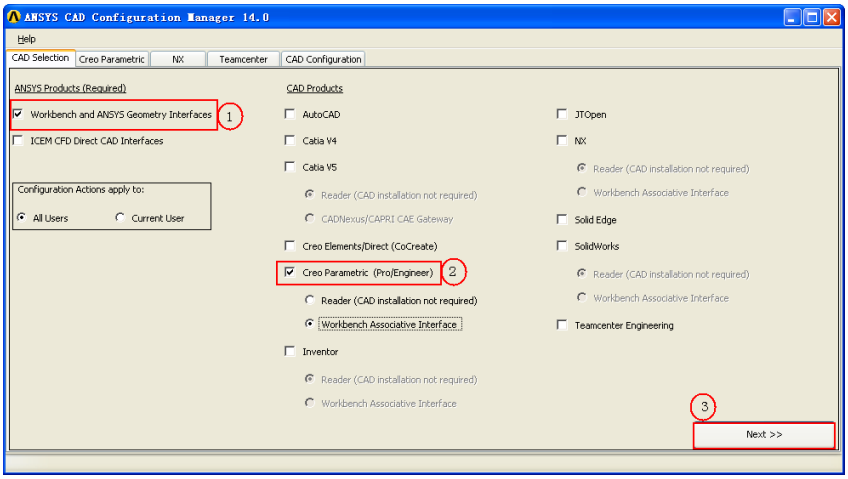


图 1-3　Pro/E 与 ANSYS 软件数据交互设置

Step3：在如图 1-4 所示的 Creo Parametric 选项卡中，依次选择 Pro/E（Creo）软件安装路径及启动路径，然后单击 Next>>按钮。

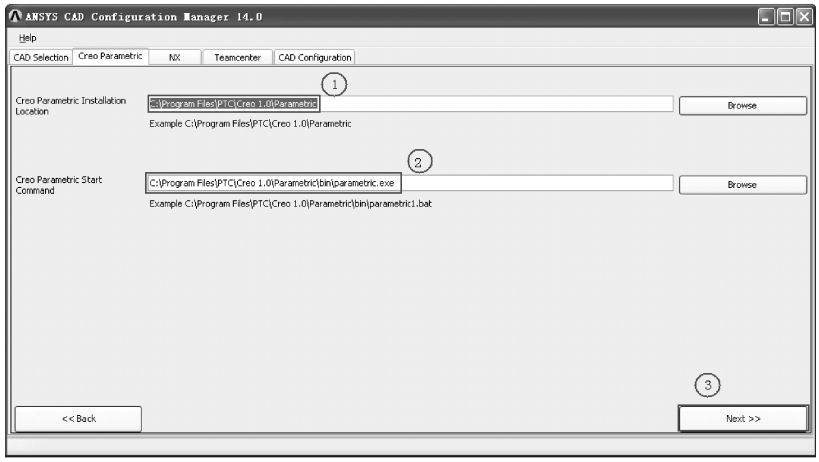


图 1-4　Pro/E 软件路径及启动路径设置

Step4：在如图 1-5 所示的 CAD Configuration 选项卡中单击 Configure Selected CAD Interface 按钮，经过一段时间，会在下面的白色面板中出现图中所示的两行文字，说明设置成功，单击 Exit 按钮，在弹出的对话框中单击“确定”按钮，退出软件设置窗口。

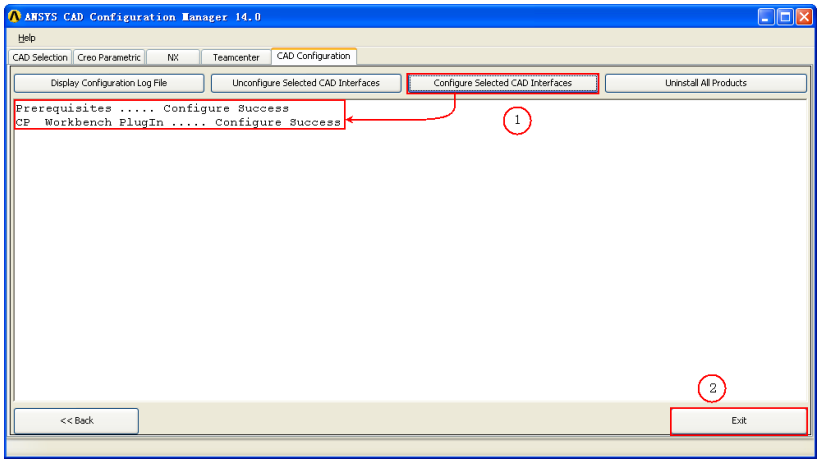


图 1-5　Pro/E 软件设置

Step5：启动 Creo Parametric 软件，此时会在工具栏中出现一个“工具”按钮，依次单击会出现如图 1-6 所示的命令。

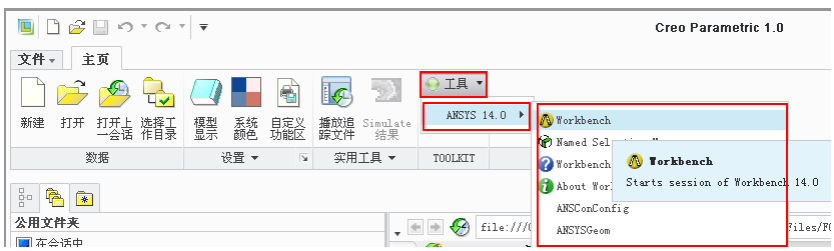


图 1-6　ANSYS14.0 集成到 Pro/E（Creo）中

上述方法简要介绍了 ANSYS 14.0 集成到 Pro/E（Creo）软件的方法，ANSYS14.0

还可以集成到 UG、Soildworks、Solidedge 中，操作与上述相似，此处不再赘述，请读者根据需要自行完成相关操作。

1.4 ANSYS Workbench 14.0 几何建模

在进行有限元分析之前，首先最重要的工作就是几何建模，几何建模的好坏直接影响到计算结果的正确性。

一般在整个有限元分析的过程中，几何建模的工作量占据了非常多的时间，同时也是非常重要的过程。本节将着重讲述利用 ANSYS Workbench 自带的几何建模工具——DesignModeler 进行几何建模。

1. DesignModeler 界面

DesignModeler 是 ANSYS Workbench 14.0 的几何建模平台，与大多数 CAD 软件有相似之处，但是也有一些其他 CAD 软件所不具有的功能。

它主要是为有限元分析服务的几何建模平台，所以有许多功能是其他 CAD 软件所不具备的，如梁单元建模（Beam）、包围（Enclose）、填充（Fill）、点焊（Spot Welds）等。

如图 1-7 所示为 DesignModeler 界面。

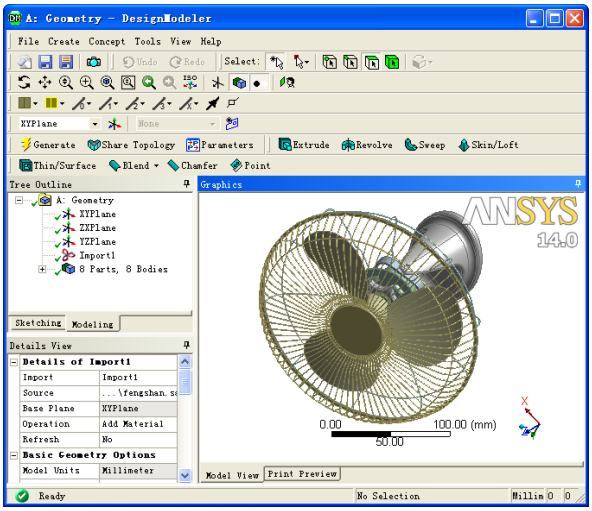


图 1-7　DesignModeler 界面

2. 几何数据的读入

DesignModeler 软件除了可以建模外，还可以对外部几何数据进行导入，有以下两种外部几何数据导入的方法：

（1）从已经打开的 CAD 中导入 CAD 数据文件（Attach to Active CAD Geometry）。

（2）导入外部几何数据（Import External Geometry File）。

如图 1-8 所示，单击菜单栏中的 File 按钮，在弹出的菜单中选择相应的命令。

当几何文件成功导入后，会在如图 1-9 所示的窗口中的 Tree Outline 中的 Geometry →Import 前面显示对号，并在下面显示实体的个数及相应文件名。

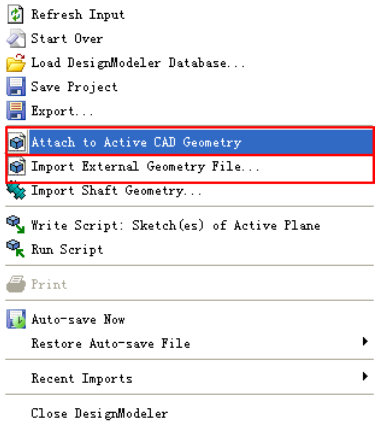


图 1-8　几何数据读入

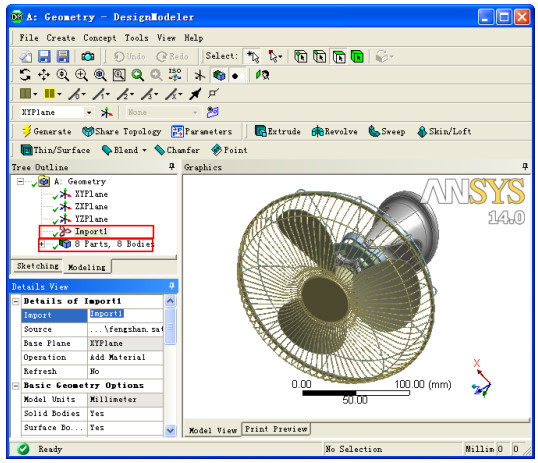


图 1-9　几何文件显示

3. DesignModeler 菜单介绍

与大多数 CAD 软件界面一样，DesignModeler 同时也允许用户配置个人窗口来满足使用要求，DesignModeler 主要功能都集成到了主菜单中，同时还将常用的工具及命令添加到工具栏中，如图 1-10 所示。

- File 菜单：包括基本的文件操作，如读入、导出、保存、运行脚本等操作，如图 1-8 所示。
- Create 菜单：创建 3D 几何模型和修改工具，如拉伸、选中、扫描、放样、倒角、阵列、布尔运算等操作，如图 1-11 所示。

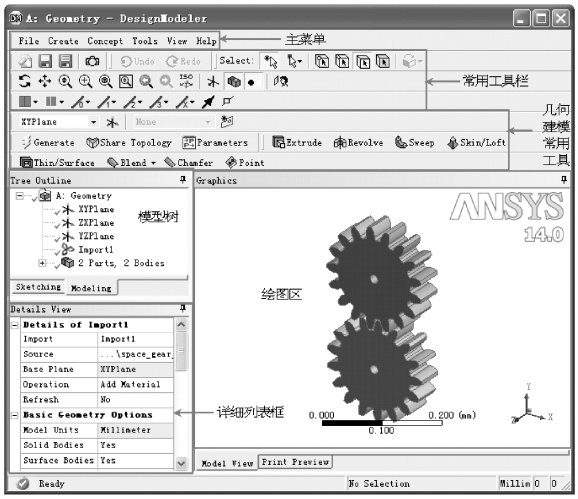


图 1-10　DesignModeler 用户界面

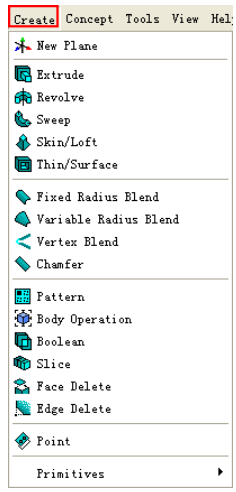


图 1-11　Create 菜单

- Concept 菜单：创建梁单元模型和壳体模型等操作，包括界面形状的定义，如图 1-12 所示。
- Tools 菜单：包括模型冻结与解冻、属性、中间面、包围、填充、模型修复等操作，如图 1-13 所示。
- View 菜单：包括模型的显示方式，如线条显示、显示实体和边、仅显示实体等操作，如图 1-14 所示。

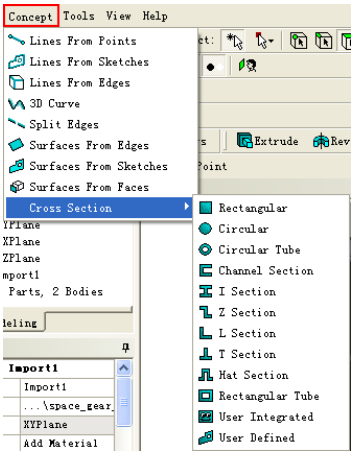


图 1-12　Concept 菜单

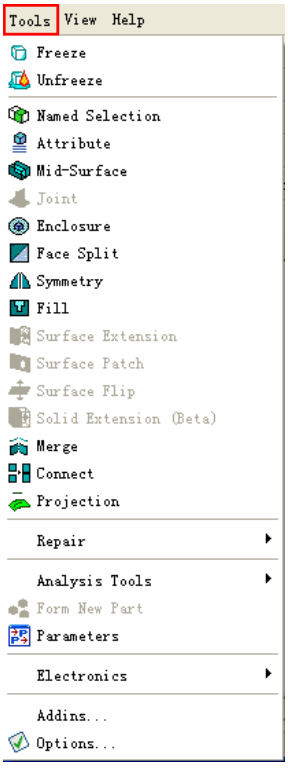


图 1-13　Tools 菜单

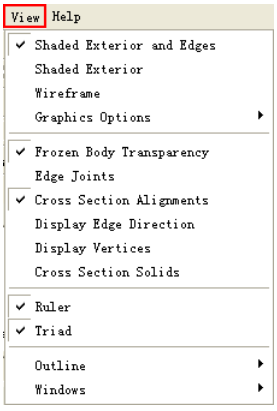


图 1-14　View 菜单

4. DesignModeler 鼠标操作

1）基本功能

以三键鼠标为例，鼠标左键实现基本控制，包括几何的选择和拖动，此外与键盘部分按钮结合使用实现不同操作。

- Ctrl+鼠标左键：执行添加/移除选定几何实体。
- Shift+鼠标中键：执行放大/缩小几何实体操作。
- Ctrl+鼠标中键：执行几何体平移操作。

另外，按住鼠标右键进行框选几何实体，可以实现几何实体的快速缩放操作，在绘图区域单击鼠标右键可以弹出快捷菜单，以完成相关的操作，如图 1-15 所示。

2）选择过滤器

在建模过程中，会经常需要选择实体的某个面、某个边或者某个点等操作，可以在

工具栏中相应的过滤器中进行选择切换，如图 1-16 所示。如果想选择齿轮上的某个齿的面，首先单击工具栏中的按钮，使其处于凹陷状态，然后选择所关心的面即可。如果想要选择线或者点，则只需单击工具栏中的或者按钮，然后点选所关心的线或者点即可。

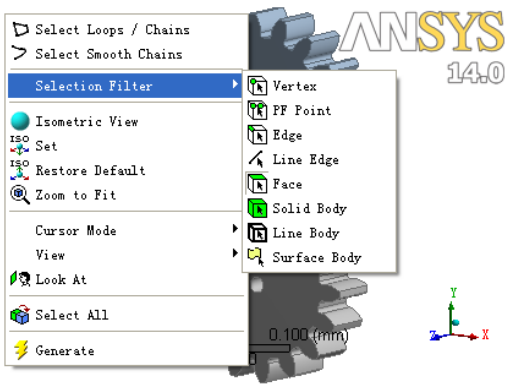


图 1-15　快捷菜单

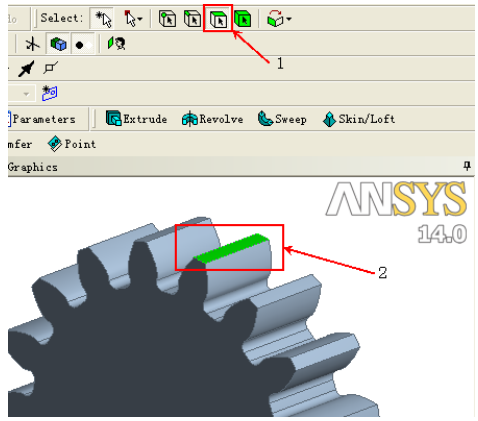


图 1-16　面选择过滤器

如果需要对多个面进行选择，如图 1-17 所示，则需要单击工具栏中按钮，在弹出的菜单中选择 Box Select 命令，然后单击按钮，在绘图区域中框选所关心的面即可。

线或者点的框选与面类似，这里不再赘述。

框选的时候有方向性，具体说明如下。

- 鼠标从左到右拖动：选中所有完全包含在选择中的对象。
- 鼠标从右到左拖动：选中包含于或经过选择框的对象。

利用鼠标还能直接对几何模型进行控制，如图 1-18 所示。

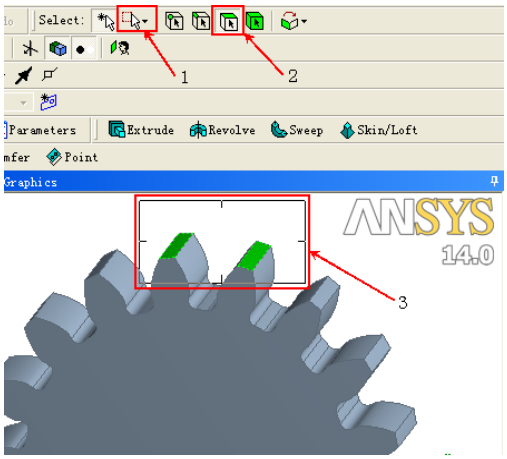


图 1-17　面框选过滤器

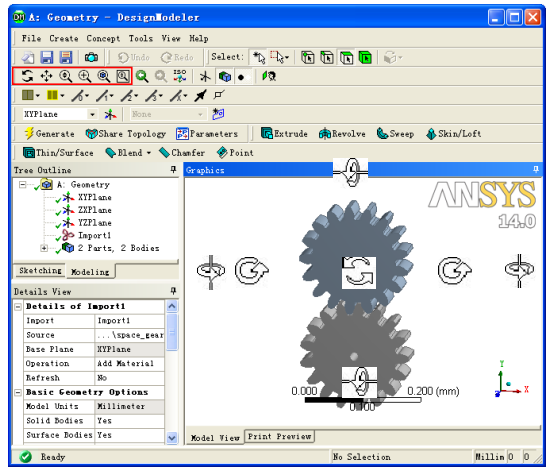


图 1-18　窗口控制

5. 窗口控制

DesignModeler 平台的工具栏上面有各种控制窗口的快捷按钮，通过单击不同按钮，实现图形控制，如图 1-18 所示。

- 按钮用来实现几何旋转操作。
- 按钮用来实现几何平移操作。
- 按钮实现图形的放大/缩小操作。
- 按钮实现窗口的缩放操作。
- 按钮实现自动匹配窗口大小操作。

利用鼠标还能直接在绘图区域控制图形，如图 1-18 所示。当鼠标位于图形的中心区域相当于操作，当鼠标位于图形之外时为绕 *Z* 轴旋转操作，当鼠标位于图形界面的上下边界附近时为绕 *X* 轴旋转操作，当鼠标位于图形界面的左右边界附近时为绕 *Y* 轴旋转操作。

6. DesignModeler 启动与草绘

与其他 CAD 软件操作方法一样，实体建模需要先创建二维图形，这部分工作在草绘模式下完成，本节主要介绍如何在草绘模式下绘制 2D 图形。

Step1：启动 ANSYS Workbench 14.0。在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：创建项目。双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建项目 A，如图 1-19 所示。

Step3：启动 DesignModeler。双击项目 A 中的 A2（Geometry）选项，此时会启动如图 1-20 所示的 DesignModeler 绘图平台，同时弹出一个“单位设置”对话框，在对话框中选择 Millimeter 选项，单击 OK 按钮，完成单位设置。

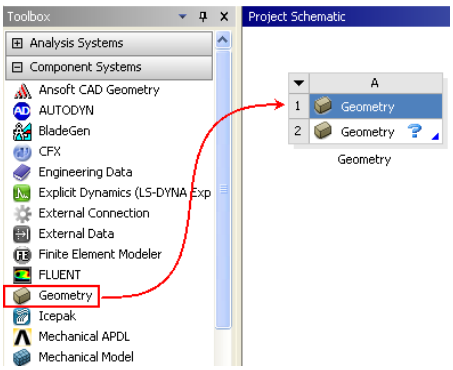


图 1-19　创建项目

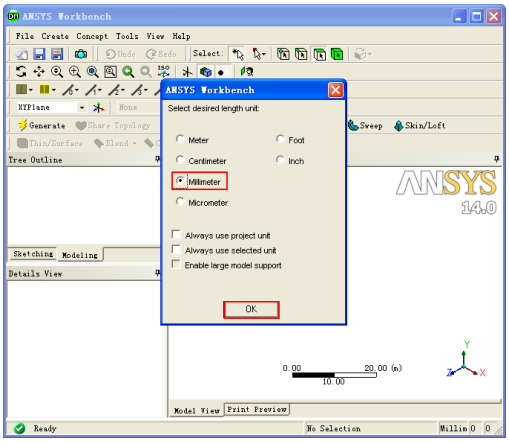


图 1-20　启动 DesignModeler

Step4：选择绘图平面。选择 Tree Outline（模型树）→A:Geometry→XYPlane 命令，此时会在绘图区域出现如图 1-21 所示的坐标平面，然后单击工具栏中的按钮，使平面正对窗口。

Step5：创建草绘。如图 1-22 所示，单击 Tree Outline 下面的 Sketching（草绘）选项卡，此时会切换到草绘命令操作面板。

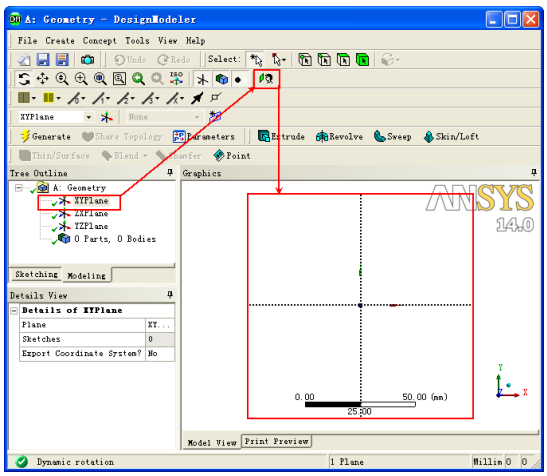


图 1-21　坐标平面

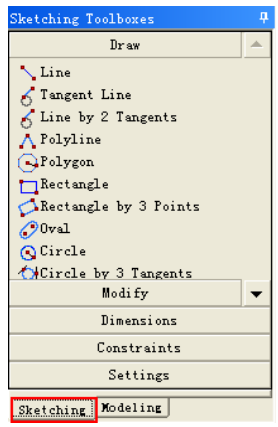


图 1-22　草绘操作面板

Step6：自动捕捉。单击 Draw→Circle 按钮，此时 Circle 按钮处于凹陷状态，即被选中，如图 1-23 所示。移动鼠标至绘图区域中的坐标原点附近，此时会在绘图区域出现 P 字符，表示此时鼠标在坐标原点。

注 意

如果鼠标在坐标轴附近移动，此时绘图区域会出现 C 字符，表示此时创建的点在坐标轴上，如图 1-24 所示。

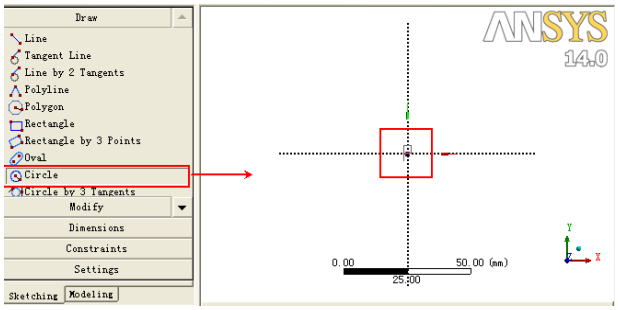


图 1-23　原点自动捕捉

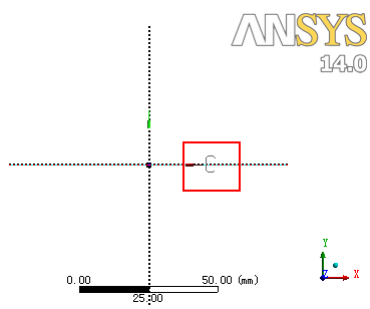


图 1-24　坐标轴自动捕捉

Step7：草绘操作。将鼠标移动到坐标原点后，单击鼠标，此时会出现如图 1-25 所示的图形，在绘图区域任意位置单击鼠标，确定圆的创建。

Step8：尺寸标注。单击 Dimensions→General 按钮，此时 General 按钮处于凹陷状态，表示一般性质的标注被选择，如图 1-26 所示，单击刚才绘制的圆，然后在 Details View 面板中 Dimensions:1 下面的 D1 后面输入 50，并按回车键，确定输入。

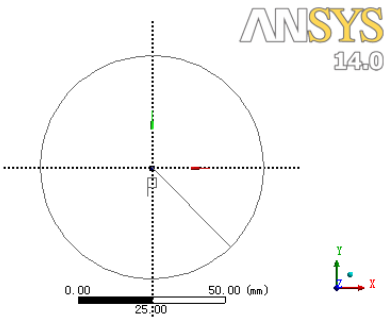


图 1-25　绘图操作

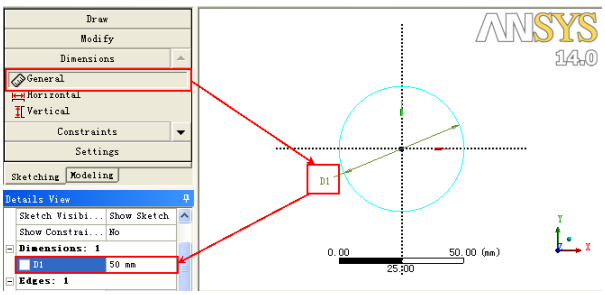


图 1-26　尺寸标注

Step9：拉伸草绘。单击 Sketching 右侧的 Modeling 按钮，将 Sketching Toolboxes（草绘工具箱）切换到 Tree Outline（模型树）下，如图 1-27 所示。

Step10：单击工具栏中的 Extrude（拉伸）按钮，此时在 Tree Outline（模型树）的 A:Geometry 下出现一个“拉伸”命令，如图 1-28 所示，在 Details View 面板中的 Details of Extrude2 下面设置如下。

① 在 Geometry 栏中 Sketch1 已被选中。

② 在 Operation 栏中选择 Add Material，默认为 Add Material。

③ 在 Extent Type→FD1,Depth（>0）栏中输入 100，其余默认。

④ 完成以上设置后，单击工具栏中的 Generate 按钮，生成拉伸特征。

注：在 Operation 栏后面的选项中有 Add Material、Add Frozen 两个操作命令，以后详细讲解。

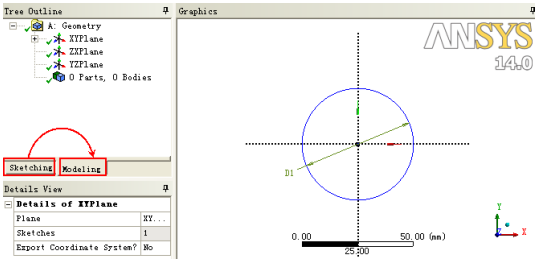


图 1-27　切换模式

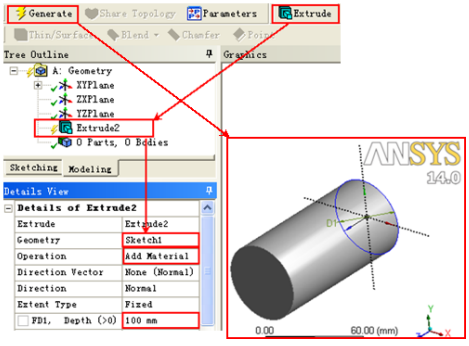


图 1-28　拉伸操作

Step11：去材料操作。与 Step7 相同，在 *YZ* 平面绘制如图 1-29 所示的圆，直径为 25mm，*V*4（距离原点的竖直距离）为 50mm，单击回车键确定。

Step12：单击工具栏中的 Extrude（拉伸）按钮，此时在 Tree Outline（模型树）的 A:Geometry 下出现一个“拉伸”选项，如图 1-30 所示，在 Details View 面板中的 Details of Extrude3 下面设置如下。

① 在 Geometry 栏中 YZPlane 已被选中。

② 在 Operation 栏中选择 Cut Material 选项，默认为 Add Material。

③ 在 Direction 栏中选择 Both-Symmetry 选项。

④ 在 Extent Type 栏中选择 To Surface 选项；单击圆柱外表面，Target Face 栏中显示 Selected。

完成以上设置后，单击工具栏中的 Generate 按钮，生成去材料特征，如图 1-31 所示。

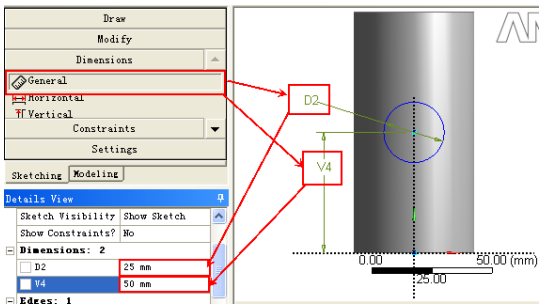


图 1-29　草绘

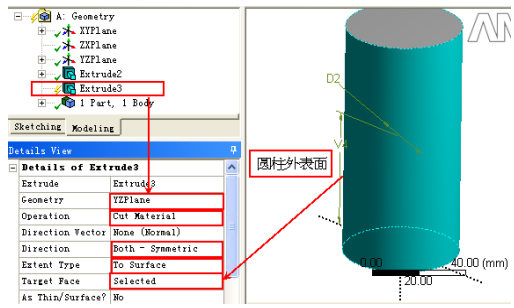


图 1-30　去材料操作

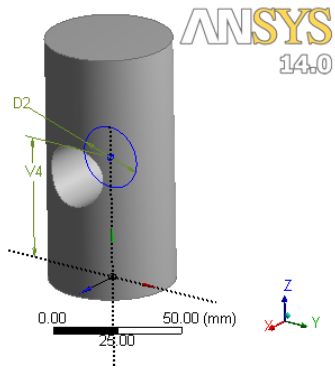


图 1-31　模型

Step13：保存模型。单击工具栏中的按钮，在弹出的如图 1-32 所示的“另存为”对话框中的文件名框内输入 extent1，单击“保存”按钮，完成模型的存储。

Step14：关闭 DesignModeler 程序，单击右上角的按钮关闭程序。

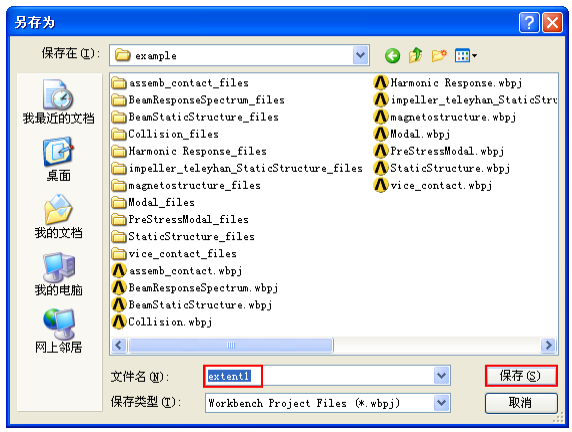


图 1-32　保存模型

7. DesignModeler 特有操作

在 DesignModeler 中有部分命令是其他 CAD 软件所不具备的功能，现在简要介绍一下比较常用的一些功能。

（1）Unfreeze（激活状态）和 Freeze（冻结状态），此命令在 Tools 菜单中，如图 1-13 所示。下面简单介绍两者的区别。

① Unfreeze：在这种状态下，几何体可以进行常规的建模等操作，如布尔运算、切材料等，但是不能被 Slice（切片）。

② Freeze：处于此状态的几何体可以进行 Slice（切片）操作，方便以后划分高质量的六面体网格。

（2）Multi-body Parts（多体部件体）：在有限元分析过程中，往往不只是单一零件的仿真计算，经常会对一个结构复杂的装配体进行仿真分析，而 DesignModeler 可以先将装配体中的某些零部件或者全部装配体组成一个或者多体部件体 Multi-body Parts，这样在形成多体部件体的零部件的仿真计算时能够实现拓扑共享。

（3）Imprint Faces（表面印记）：当对一个零件施加载荷的时候，如果只需要对一个表面的一小块区域施加外部载荷，这样就需要首先在表面进行表面印记操作。

在如图 1-31 所示模型的零部件的上端（处于 *Z* 轴最大位置处）圆面上的直径 10mm 范围内施加 100N 的力，方向为 *Z* 轴负方向，具体操作如下。

Step1：读取文件。在 Workbench 主窗口的工具栏中单击 Open... 命令，如图 1-33 所示，找到文件路径与 extent1 文件名，单击“打开”按钮。

Step2：此时在 Workbench 主窗口的“项目管理”窗口中加载了一个项目 A，如图 1-34 所示。

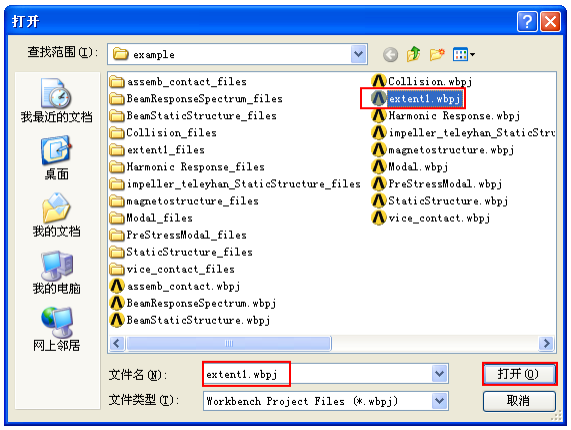


图 1-33　打开模型 1

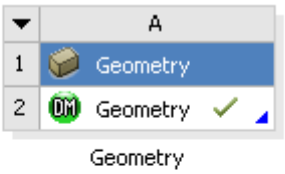


图 1-34　项目 A

Step3：双击项目 A 中的 A2（Geometry）表格，此时 DesignModeler 平台将被加载。

Step4：当 DesignModeler 加载成功后，如图 1-35 所示。

Step5：选择模型的上端面，然后在工具栏中单击 按钮，然后单击 Sketching 选项卡，切换到草绘状态，如图 1-36 所示。

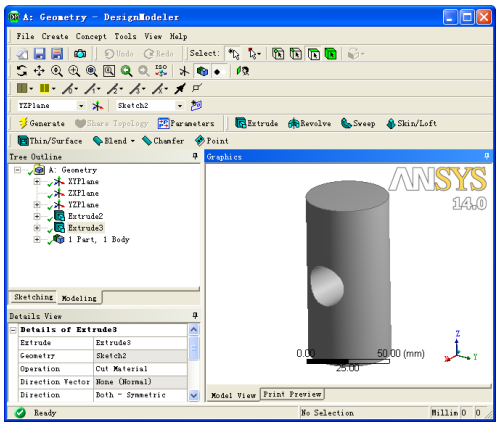


图 1-35　打开模型 2

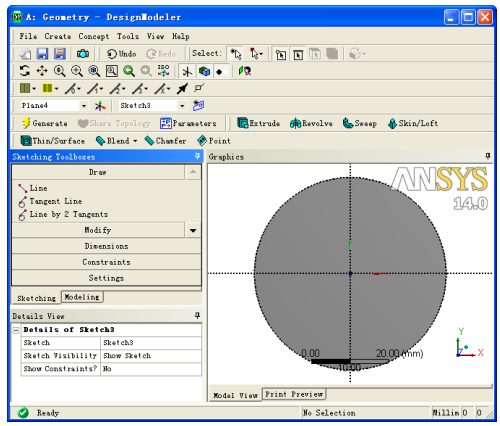


图 1-36　草绘 1

Step6：如图 1-37 所示，在中心绘制一个直径为 10mm 的圆。

Step7：将状态切换到 Modeling 状态，单击 Extrude 按钮，此时在 Tree Outline（模型树）的 A:Geometry 下出现一个“拉伸”命令，如图 1-38 所示，在 Details View 面板中的 Details of Extrude4 下面做如下设置：

① 在 Geometry 栏中 Sketch3 已被选中。

② 在 Operation 栏中选择 Imprint Faces 选项，默认为 Add Material。

③ 其余设置保持默认即可。

完成以上设置后，单击工具栏中的 Generate 按钮，生成印记特征，如图 1-39 所示，这时，就可以在印记特征上施加载荷了，如图 1-40 所示，在印记面上施加 100N 的力，方向为 *Z* 轴负方向。

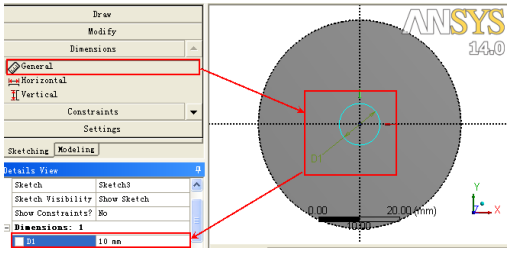


图 1-37　草绘 2

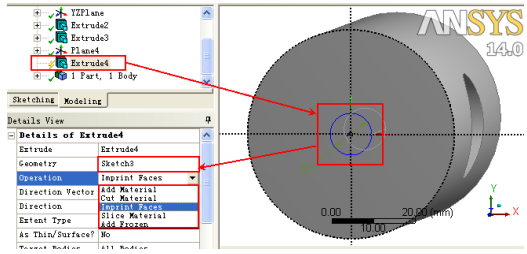


图 1-38　印记设置

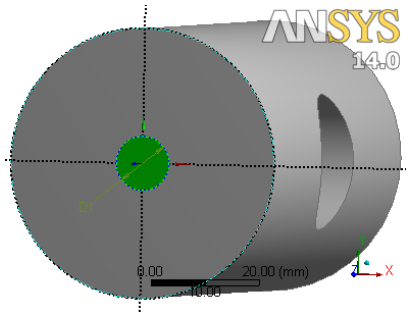


图 1-39　印记特征

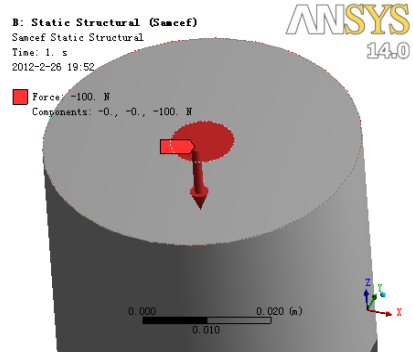


图 1-40　施加载荷

Step8：保存文件。切换到 Workbench 主界面中，单击工具栏中的Save As...按钮，在弹出的如图 1-41 所示的“另存为”对话框中的文件名框内输入 extent2.wbpj，单击“保存”按钮，完成模型的存储。

Step9：关闭 DesignModeler 程序。单击右上角的按钮关闭程序。

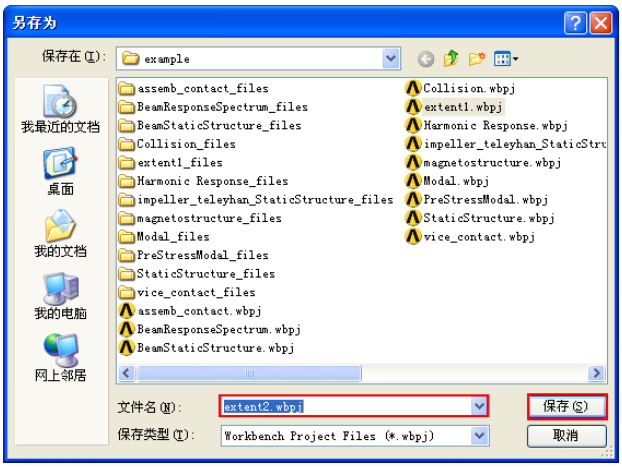


图 1-41　“另存为”对话框

（4）Fill（填充）：这个特征是为 CFD（计算流体力学）服务的。图 1-42 所示的三通管道模型有两个进水口和一个出水口。流体在管道内流动，如果想对图示的三通管道进行流体动力学分析，而且在建模过程中只创建了管道部分，即固体部分，而流体动力学分析实际上是对内部的流体进行分析，此时就需要对现有实体（三通管道）进行 Fill 操作，使其在内部生成流体部分，具体操作步骤如下。

Step1：新创建一个项目 A。然后在项目 A 的 A2（Geometry）中右击，选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 1-43 所示。

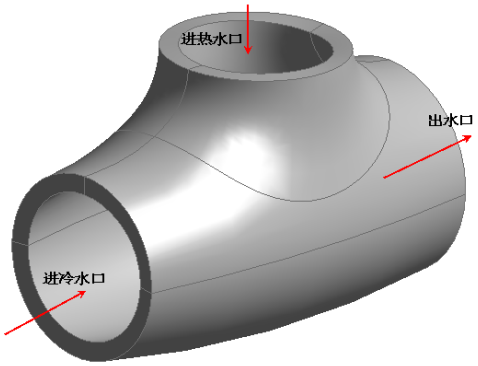


图 1-42　三通模型

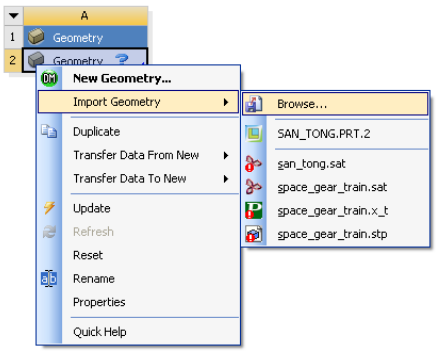


图 1-43　读入文件

Step2：在弹出的如图 1-44 所示的“打开”对话框中选择 san_tong.sat 文件，并单击“打开”按钮。

Step3：双击项目 A 中的 A2Geometry 栏，启动 DesignModeler，单位选择 mm，关闭“单位设置”对话框，DesignModeler 平台显示的模型如图 1-45 所示。

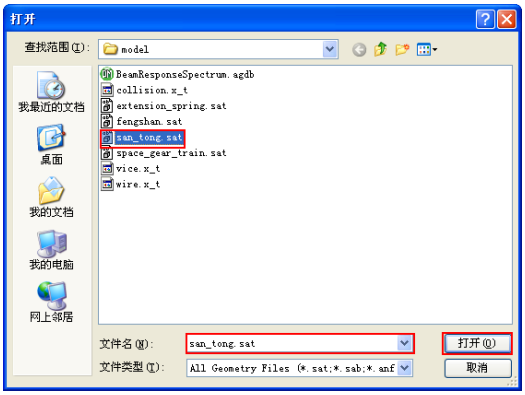


图 1-44　打开文件

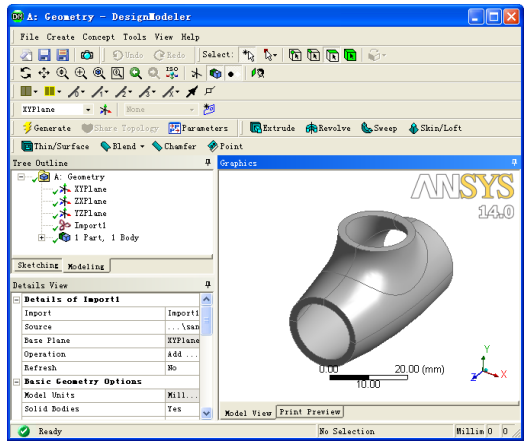
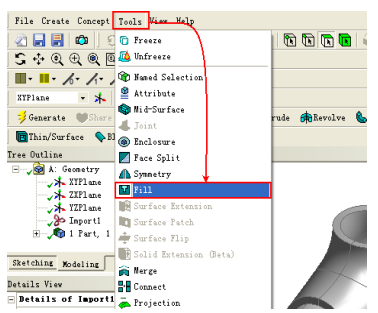
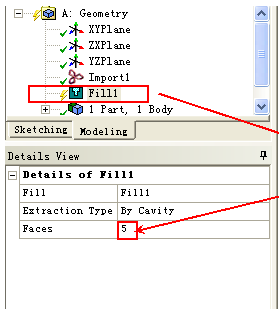


图 1-45　模型显示

Step4：选择 Tools→Fill 命令，如图 1-46 所示，此时会在模型树中出现一个 Fill 命令。

Step5：选择三通管道模型的所有内部面，按住键盘 Ctrl 键，同时依次选择三通管道的所有内部表面，如图 1-47 所示，在 Details View 面板中的 Details of Fill→Faces 中单击 Apply 按钮，完成内部表面的选取。





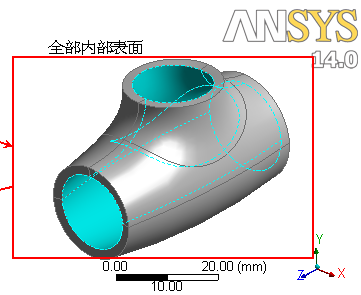


图 1-46　Fill 命令

图 1-47　选择内表面

Step6：单击工具栏中的 Generate 按钮，生成流体模型特征，如图 1-48 和图 1-49 所示。

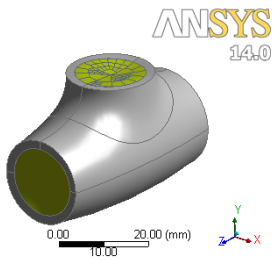


图 1-48　流体模型

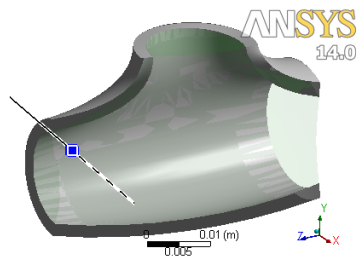


图 1-49　流体部分剖面

Step7：保存文件。切换到 Workbench 主界面中，单击工具栏中的 Save As... 按钮，在弹出的如图 1-50 所示的“另存为”对话框中的文件名框内输入 Fill1，单击“保存”按钮，

完成模型的存储。

Step8：关闭 DesignModeler 程序。单击右上角的按钮关闭程序。

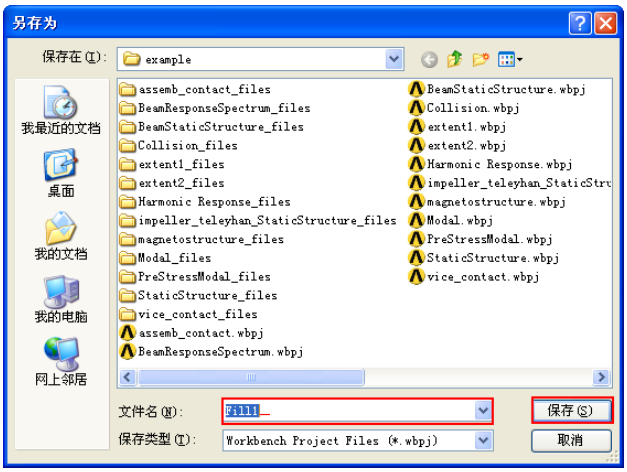


图 1-50　保存文件

（5）Enclose（包围）：这个特征是为流体动力学（CFD）及电磁场有限元分析（EMAG）服务的，通过 Enclose 操作可以计算物体的外部流场或者绕组的电场或磁场分布。这个操作方法与 Fill 操作类似，用一个如图 1-51 所示的直升飞机的模型来简要介绍 Enclose 操作步骤。

Step1：新创建一个项目 A，然后在项目 A 的 A2（Geometry）中右击，选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 1-52 所示。

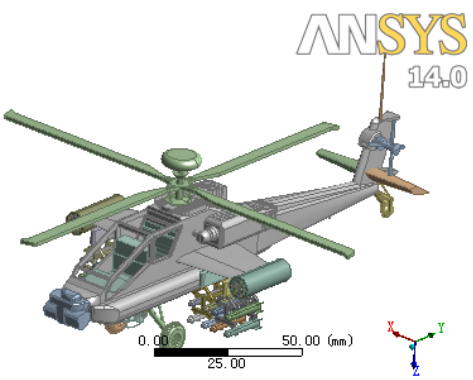


图 1-51　飞机模型

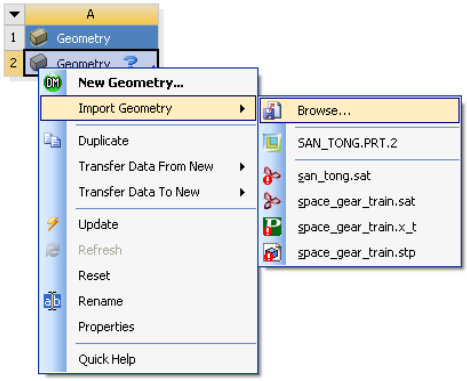


图 1-52　读入文件

Step2：在弹出的如图 1-53 所示的“打开”对话框中选择 apaqi.sat 文件，并单击“打开”按钮。

Step3：双击项目 A 中的 A2（Geometry）栏，启动 DesignModeler，单位选择 mm，关闭“单位设置”对话框，DesignModeler 平台显示的模型如图 1-54 所示。

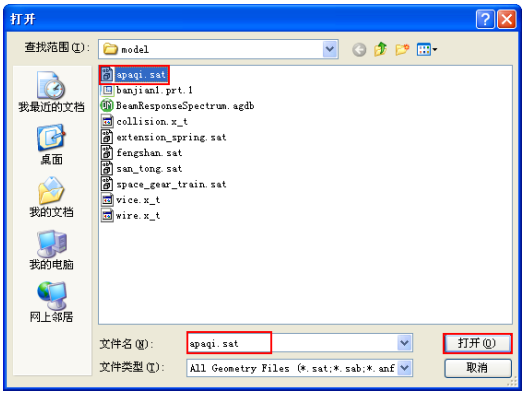


图 1-53　打开文件

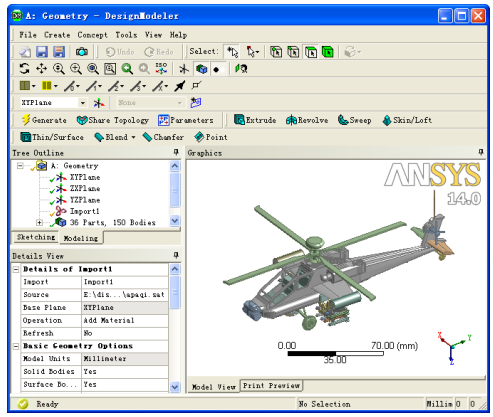


图 1-54　模型显示

Step4：选择 Tools→Enclosure 命令，如图 1-55 所示，此时会在模型树中出现一个 Enclosure 命令。

Step5：如图 1-56 所示，在 Details View 面板中做如下操作。

① 在 Shape 栏中选择 Box 选项，即默认选项。

② 在 FD1,Cushion +X value（>0）、FD2,Cushion +Y value（>0）、FD1,Cushion +Z value（>0）、FD1,Cushion −X value（>0）、FD2,Cushion -Y value（>0）、FD1,Cushion -Z value（>0）六栏中分别输入 30mm，其余默认即可。

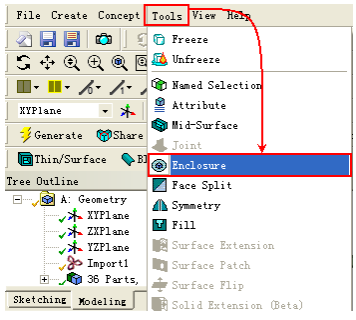


图 1-55　Enclose 命令

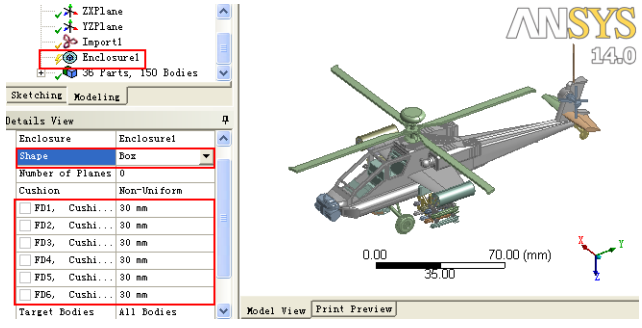


图 1-56　选择内表面

Step6：单击工具栏中的 Generate 按钮，生成飞机及外部流场模型，如图 1-57 所示。

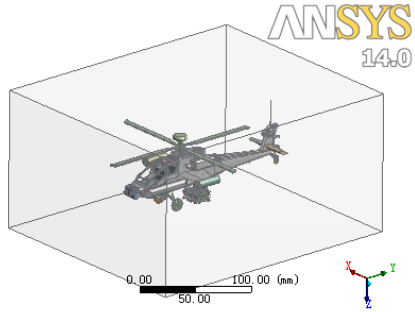


图 1-57　飞机及外部流场模型

Step7：保存文件。切换到 Workbench 主界面中，单击工具栏中的Save As...按钮，在弹出的如图 1-58 所示的“另存为”对话框中的文件名框内输入 Enclose1，单击“保存”按钮，完成模型的存储。

Step8：关闭 DesignModeler 程序。单击右上角的按钮关闭程序。

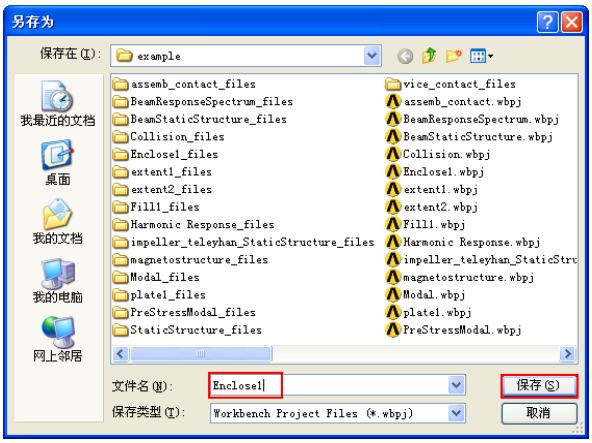


图 1-58　保存文件

8. 几何建模实例

在初步了解了 DesignModeler 的基本功能后，现在通过一个实例来巩固一下，下面的实例首先利用 Pro/E（Creo）软件加载一个几何数据文件，然后通过集成在 Pro/E（Creo）上的 Workbench 菜单将几何数据文件导入 DesignModeler 中，并在 DesignModeler 中进行去材料操作，具体过程如下。

Step1：打开 Creo Parametric 程序，如图 1-59 所示，在工具栏上单击“打开”按钮，在弹出的“文件打开”对话框中选择 banjian1.prt 文件名，此时在下面的预览区域会出现几何文件图形，单击“打开”按钮。

Step2：读入几何文件后的图形如图 1-60 所示。



图 1-59　文件读入

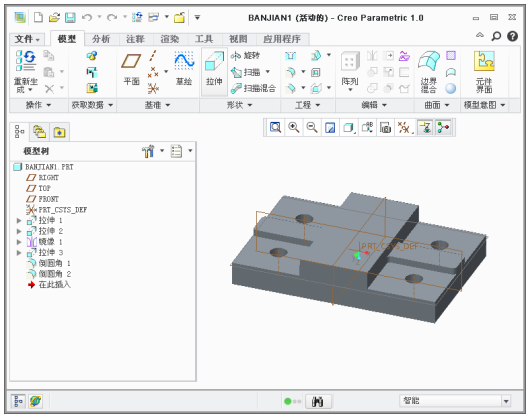


图 1-60　文件模型

Step3：如图 1-61 所示，选择工具菜单→工具→ANSYS 14.0→Workbench 命令，此

时开始加载 ANSYS Workbench 软件。

Step4：数据加载成功后，程序将在 Workbench 主界面上自动创建项目 A，如图 1-62 所示。

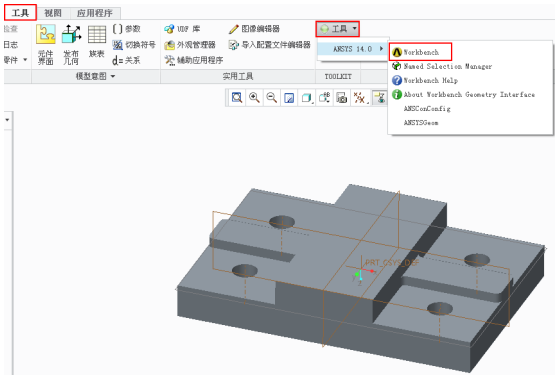


图 1-61　几何数据显示

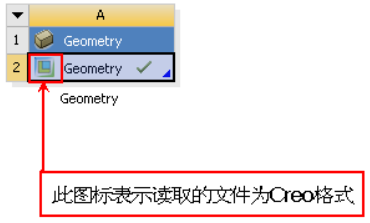


图 1-62　创建项目 A

Step5：双击项目 A 中的 A2（Geometry）选项，此时会加载 DesignModeler 几何建模平台，如图 1-63 所示，设置单位为 mm，关闭“单位设置”对话框，此时在 Tree Outline 下面的 A:Geometry 下出现一个 Attach1 命令。

Step6：单击工具栏中的 Generate 按钮，如图 1-64 所示，生成几何图形。

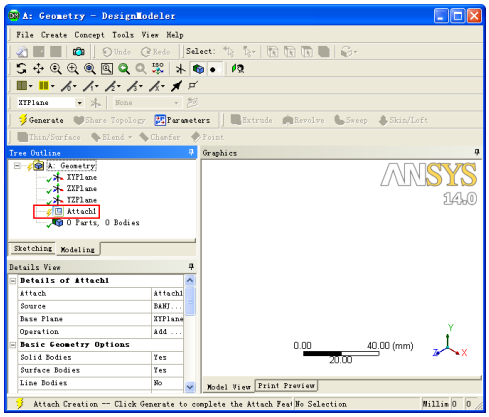


图 1-63　DesignModeler 几何建模平台

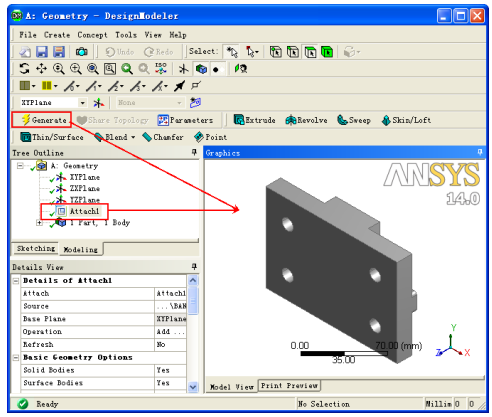


图 1-64　DesignModeler 中的几何图形 1

Step7：单击要进行操作的平面，此面位于 *Z* 轴最大位置，如图 1-65 所示，单击 按钮，在左侧的 Tree Outline 下侧单击 Sketching 选项卡，切换到草绘模式。

Step8：在 Sketching Toolboxes（草绘工具箱）面板中选择 Draw→Rectangle（矩形）命令并且勾选后面的 Auto-Fillet 图标，此图标表示创建的矩形带倒角。在绘图区域绘制矩形，如图 1-66 所示。

Step9：选择 Dimensions→Radius 命令，选择矩形的一个倒角圆弧，单击鼠标确定，如图 1-67 所示，此时会在圆弧上标注出 *R*1。

Step10：选择 Dimensions→Horizontal 命令标注如图 1-68 所示的水平尺寸，同样操作，选择 Dimensions→Horizontal 命令标注垂直尺寸。

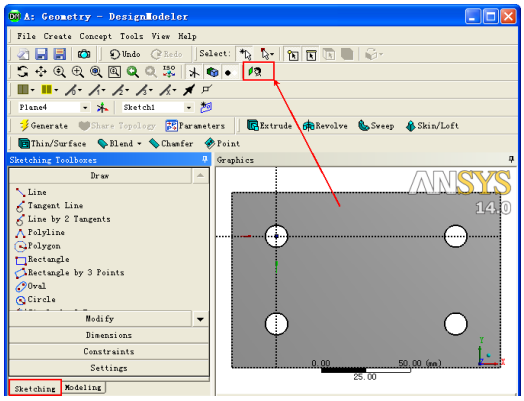


图 1-65　DesignModeler 界面

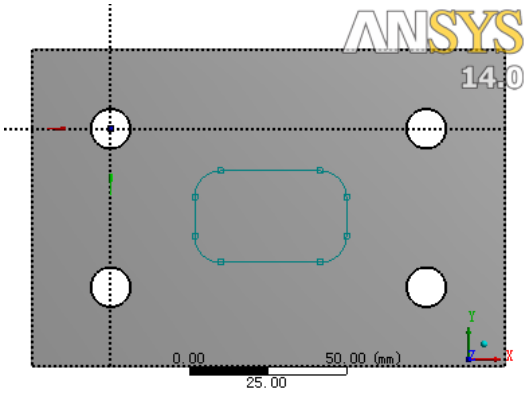


图 1-66　DesignModeler 中的几何图形 2

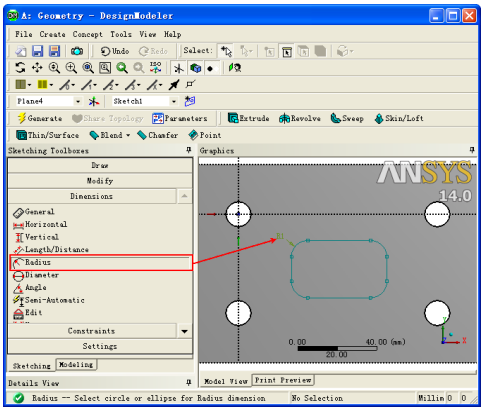


图 1-67　半径标注

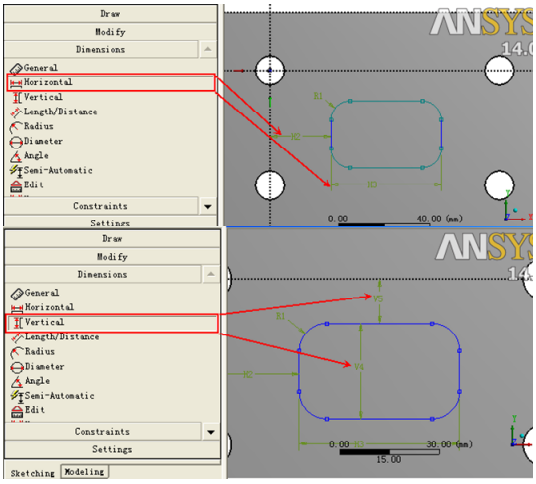


图 1-68　尺寸标注

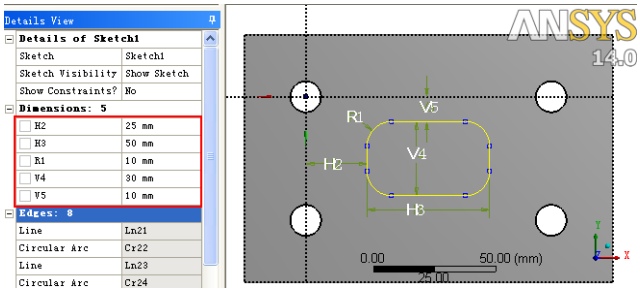
Step11：如图 1-69 所示，在 Details View 面板中的 Dimensions:5 中更改以下参数。

① 在 H2 栏中输入 25mm；在 H3 栏中输入 50mm。

② 在 R1 栏中输入 10mm。

③ 在 V4 栏中输入 30mm；在 V5 栏中输入 10mm。

④ 其余默认即可。



Details View	
Details of Sketch1	
Sketch	Sketch1
Sketch Visibility	Show Sketch
Show Constraints?	No
Dimensions: 5	
H2	25 mm
H3	50 mm
R1	10 mm
V4	30 mm
V5	10 mm
Edges: 8	
Line	Ln21
Circular Arc	Cr22
Line	Ln23
Circular Arc	Cr24

图 1-69　修改标注 1

Step12：如图 1-70 所示，单击工具栏中的 Extrude 按钮，在 Details View 面板中做如下修改。

① 在 Operation 栏中选择 Cut Material 选项，默认为 Add Material。

② 在 Direction 栏中选择 Reversed 选项，表示拉伸方向为默认的反方向。

③ 在 FD1,Depth（>0）栏中输入 10mm，其余设置默认即可。

Step13：单击工具栏中的 Generate 按钮，生成去材料特征，如图 1-71 所示。

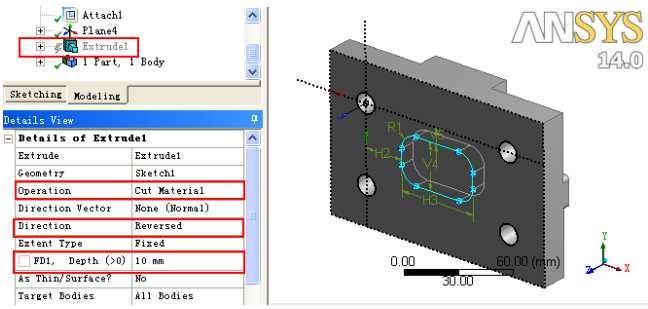


图 1-70　修改标注 2

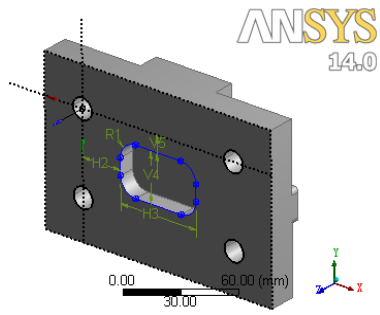


图 1-71　去除材料

Step14：单击工具栏中的 Blend 按钮，并选择 Fixed Radius 选项，同时会在 Tree Outline（模型树）中出现 FBlend1 命令。

Step15：如图 1-72 所示，在 Details View 面板中做如下修改。

① 在 FD1,Radius（>0）栏中输入 10mm。

② 选择模型的四个边，在 Geometry 栏中确定如图 1-72 所示的四个边界被选中。

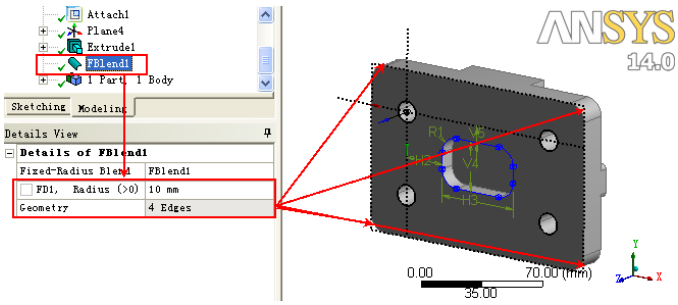


图 1-72　倒角命令

Step16：单击工具栏中的按钮，在弹出的“保存”对话框中输入 plate1，单击“保存”按钮保存文件。

Step17：关闭 DesignModeler 程序。单击右上角的按钮关闭程序。

9. 概念建模实例

概念建模（Concept）主要用于创建和修改模型中的线或者面，使之成为有限元中的梁单元（Beam）或者壳单元（Shell）。Concept 菜单如图 1-12 所示，从菜单可知，有以下四种生成梁模型的方法，即 Lines From Points（点生成线）、Lines From Sketches（草绘生成线）、Lines From Edges（边线生成线）、3D Curve（从 3D 曲线生成线）。

生成面的方式有以下两种，即 Surfaces From Edges（边线生成面）、Surfaces From Sketches（草绘生成面）。

此外，菜单中还有一些常见形状的截面形状及用户自定义截面，如长方形、圆形、空心圆形等。

下面通过一个例子简要介绍概念建模的过程及截面属性赋予方法，如图 1-73 所示。

Step1：新创建一个项目 A，然后在项目 A 的 A2（Geometry）中右击，选择 Edit Geometry…命令，如图 1-74 所示。

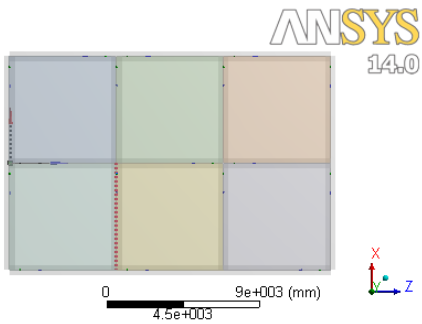


图 1-73　模型

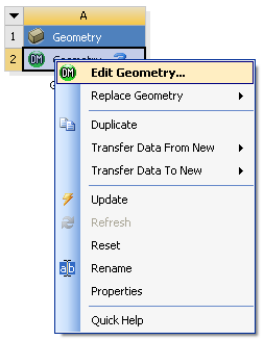


图 1-74　编辑几何文件

Step2：启动 DesignModeler 平台，同时弹出“单位设置”对话框，如图 1-75 所示，设置单位为 mm，单击 OK 按钮关闭“单位设置”对话框。

Step3：单击 Tree Outline 中 A:Geometry→ZXPlane 坐标，如图 1-76 所示，然后单击图标。

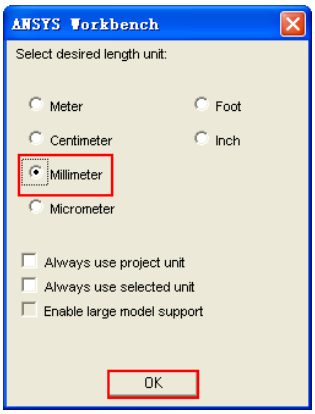


图 1-75　单位设置

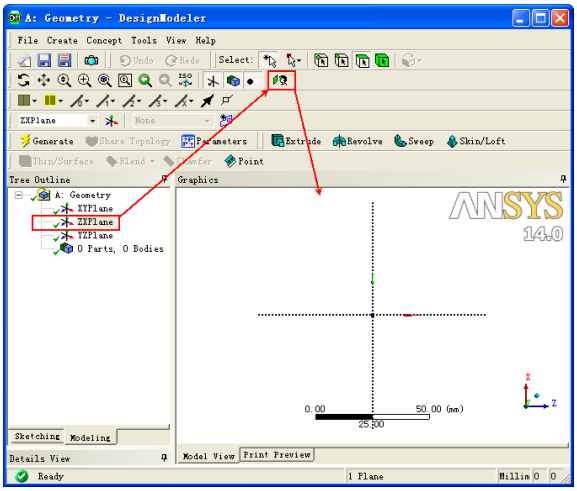


图 1-76　草绘平面

Step4：切换到 Sketching 草绘模式后，选择 Draw→Line 命令，在绘图区域绘制如图 1-77 所示的图形。

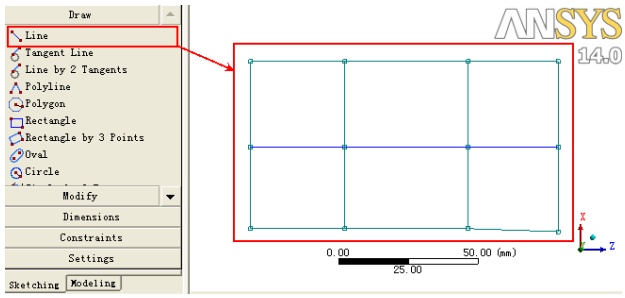


图 1-77　草绘

Step5：如图 1-78 所示，选择 Constraints→Parallel 命令，然后单击图形右下角的两根水平线段，如图 1-78 右侧所示，使其被约束为平行。

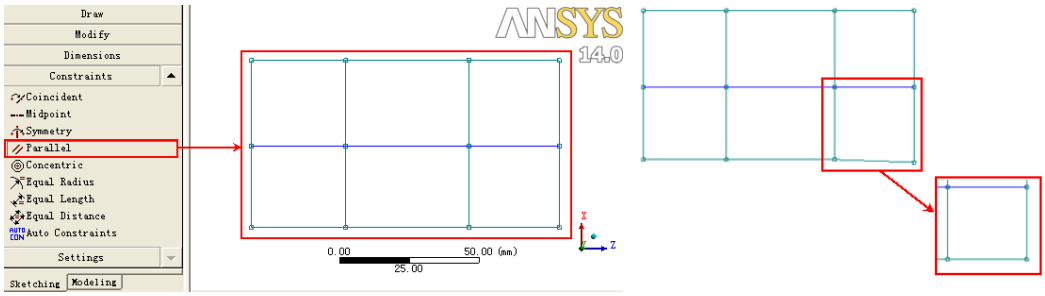


图 1-78　平行约束

Step6：如图 1-79 所示，选择 Constraints→Equal Length 命令，然后单击图形的各条线，约束各条边的长度相等。

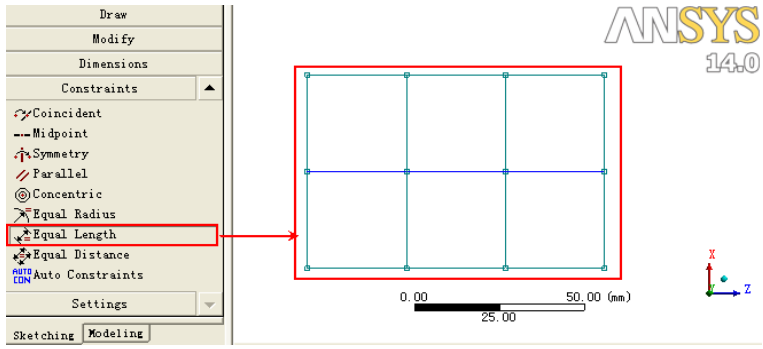


图 1-79　边长相等约束

Step7：如图 1-80 所示，选择 Dimensions→General 命令，然后单击图形的任何一根线段，标注其长度，在 Details View 面板中的 Dimensions:1→H4 栏中输入 6300mm，并按回车键确定。

Step8：切换到 Modeling 模式下，选择 Concept 菜单下的 Lines From Sketches（草绘生成线）子菜单，如图 1-81 所示，在下面出现的 Details View 面板中的 Details of Line1→Base Objects 栏中选择刚刚草绘的图形，然后单击 Apply 按钮确定选择。

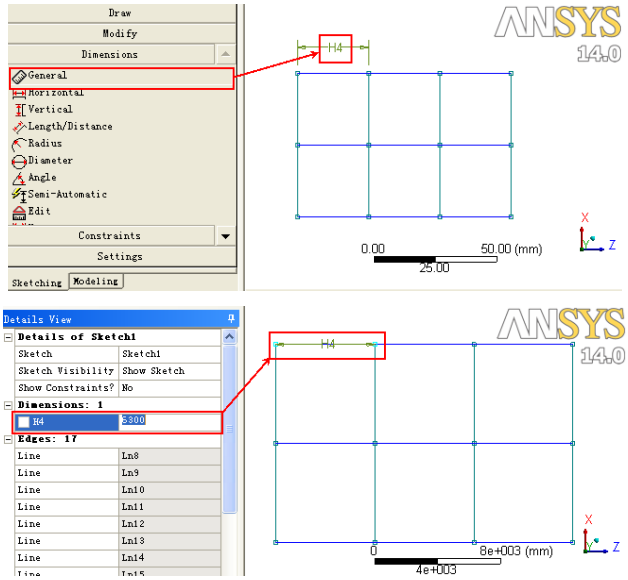


图 1-80　标注长度

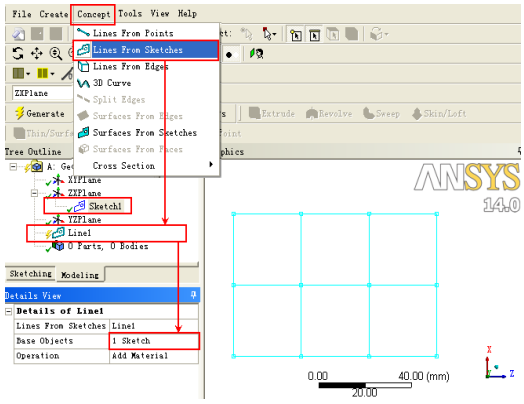


图 1-81　保存文件

Step9：单击工具栏中的 Generate 按钮生成线体，如图 1-82 所示。

Step10：选择 1 Part, 1 Body 下面的 Line Body 命令，如图 1-83 所示，在下面出现的 Details View 面板中的 Cross Section 栏为黄色，里面内容为 Not Selected，表示界面特性未被选择。

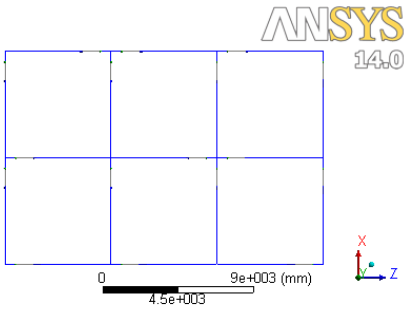


图 1-82　线体模型

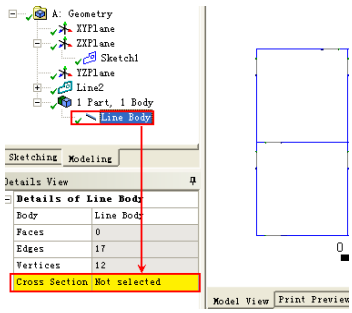


图 1-83　未赋予截面特性

Step11：选择 Concept 菜单中 Cross Section→Rectangular 子菜单，如图 1-84 所示，在 Details View 面板中的 Dimensions:2 下面的 B 栏中输入 600mm，H 栏中输入 300mm，并按回车键确定输入。

Step12：选择 Line Body 命令，如图 1-85 所示，在 Details View 面板的 Cross Section 栏中选择 Rect1 选项。

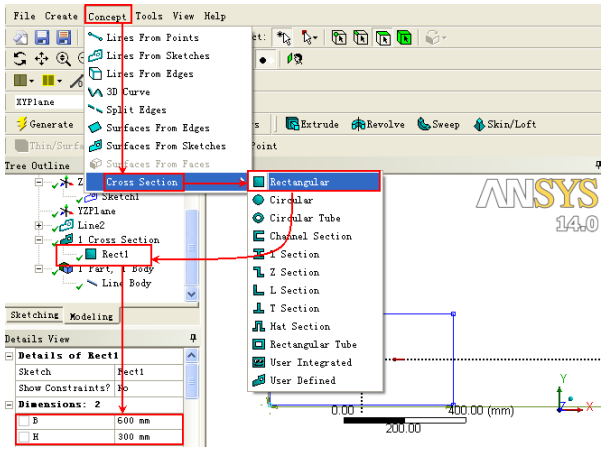


图 1-84　截面特性定义

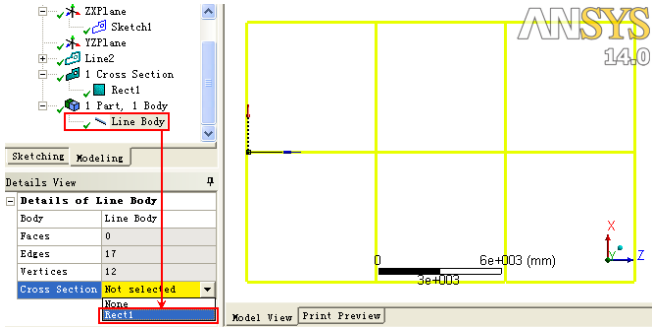


图 1-85　赋截面特性

Step13：显示图形截面。选择 View 菜单中的 Cross Section Solids 子菜单，如图 1-86 所示，此时，Cross Section Solids 子菜单前面会出现一个 √，表示子菜单被选中，同时图形显示为如图 1-86 右侧所示。

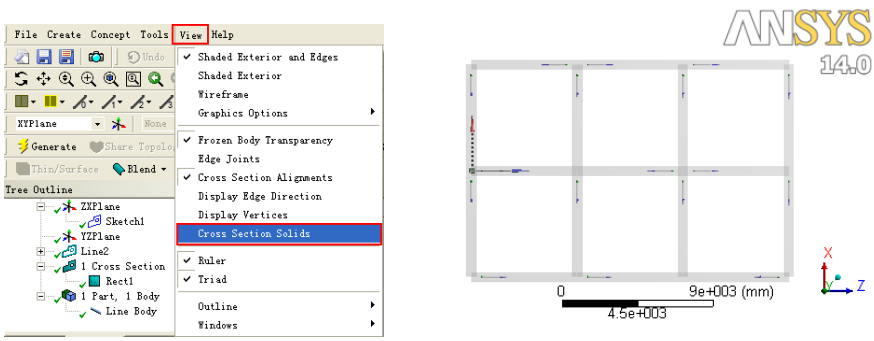


图 1-86　图形显示设置

Step14：创建壳模型。如图 1-87 所示，选择 Concept 菜单中的 Surfaces From Edges（边线生成曲面）子菜单。

Step15：选择 Tree Outline（模型树）中的 Surf 3 选项，选择绘图区域的四条边线，如图 1-88 所示。在 Details View 面板中的 Edges 栏中单击 Apply 按钮，并单击工具栏中的 Generate 图标生成壳体。

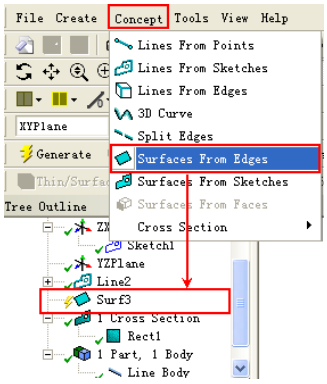


图 1-87　边线生成曲面命令 1

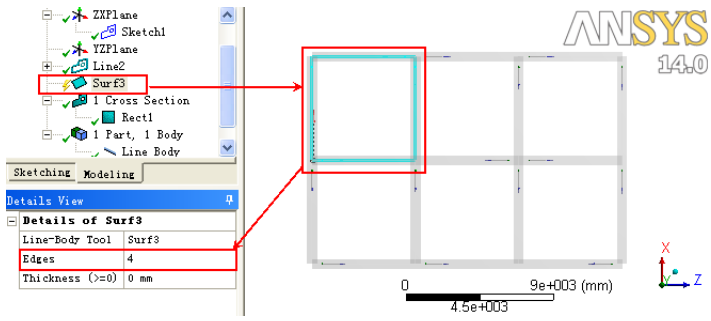


图 1-88　边线生成曲面命令 2

Step16：以同样方法完成其余五个区域的曲面设置，设置完成后如图 1-89 所示。

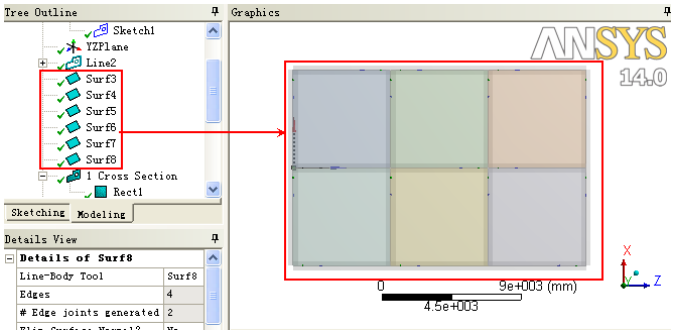


图 1-89　边线生成曲面命令 3

Step17：单击工具栏中的按钮，在弹出的“另存为”对话框中输入 Concept1，如图 1-90 所示，单击“保存”按钮保存文件。关闭 DesignModeler 程序，单击右上角的按钮关闭程序。

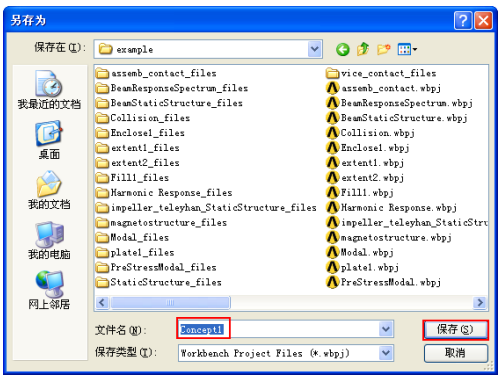


图 1-90　保存文件

1.5 ANSYS Workbench 14.0 网格划分工具

网格生成是工程仿真分析不可缺少的一部分，网格过多会导致求解时间增长，网格过少会影响计算结果的精度。

ANSYS Workbench 的 Meshing 平台可以同时满足要求，在每一个工程仿真分析中都能确保良好的网格质量和较高的自动化程度。ANSYS Meshing 的技术是建立在高级、领先的网格划分工具上，其强大的网格划分功能集中了网格划分工具的所有优势。

高度自动化的网格划分工具可以生成以下网格，即

四面体、六面体核心、六面体、贴体直角网格、棱柱膨胀层、剪切直角网格、六面体膨胀层。

改变用户控制策略可以随时改变划分方法，在同一个模型上也可以使用多种方法。网格之间的连接自动实现。

不同的物理学科要求不同的网格划分方法。流体动力学仿真分析要求在单元形状和尺寸变化过渡等均要求高质量的网格。结构力学仿真分析要求更高效率的网格划分，因为过多的网格会影响运算时间。

ANSYS Meshing 根据物理学科不同而对网格划分算法的各种细节进行设置，以确保每一种仿真分析都有合适的网格。

ANSYS Workbench 平台上的网格划分工具有以下特性。

- 参数化：参数驱动整个系统。
- 持久性：模型更新贯穿整个系统。
- 高度自动化：简单的网格输入控制就能快速实现分析。
- 灵活性：添加网格控制措施，不会使工作流变复杂。
- 物理场相关性：根据不同的物理场进行自动建模和仿真。
- 自适应架构：开放的系统能够与特定过程连接，如 CAD 中间文件，其他类型的网格格式，不同的求解器等

1. Mesh 界面

Mesh 平台界面如图 1-91 所示，界面主要分为五部分，即菜单和工具栏、模型树（Outline）、详细列表区、图形工作区及信息显示区，每个部分都有其特有的功能。

（1）菜单及工具栏：主要功能是文件读取与保存、图形显示方式、图形选取过滤设置、图形移动与旋转操作、单位设置等。

（2）模型树：在 Mesh 平台中，模型树主要功能是完成几何图形的网格设置，包括网格划分方法及网格大小控制等。

（3）图形工作区：主要功能是用户提供可视化及交互的操作平台。

（4）详细列表区：针对模型树中不同的命令，提供详细的设置信息，如选择 Mesh 选项时，会出现网格相关的一些设置。

（5）信息显示区：主要功能是提示用户在网格划分过程中出现的一些信息，如警告、错误等。

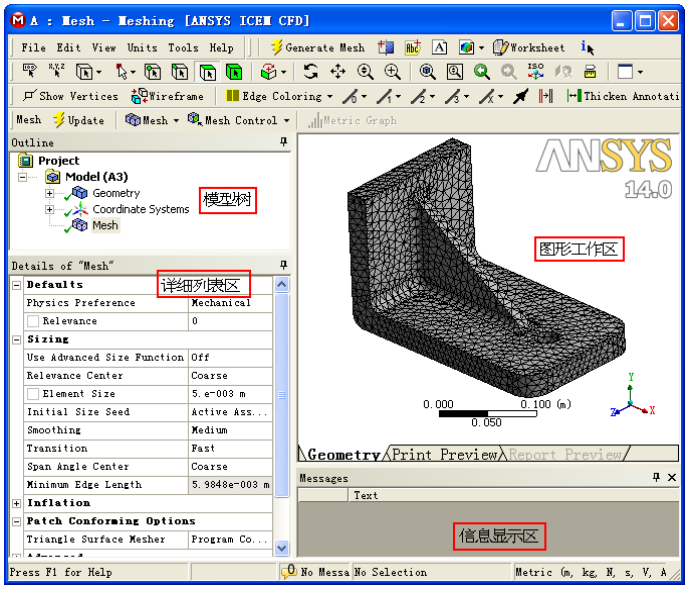


图 1-91　Mesh 平台

2. Mesh 网格划分方法

Mesh 平台可以根据物理场提供不同的网格划分方法，图 1-92 所示为 Mesh 平台的物理场参照类型（Physics Preference）。

（1）Mechanical：为结构及热力学有限元分析提供网格划分。

（2）Electromagnetics：为电磁场有限元分析提供网格划分。

（3）CFD：为计算流体动力学分析提供网格划分，如 CFX 及 Fluent 求解器。

（4）Explicit：为显示动力学分析软件提供网格划分，如 AUTODYN 及 LS-DYNA 求解器。

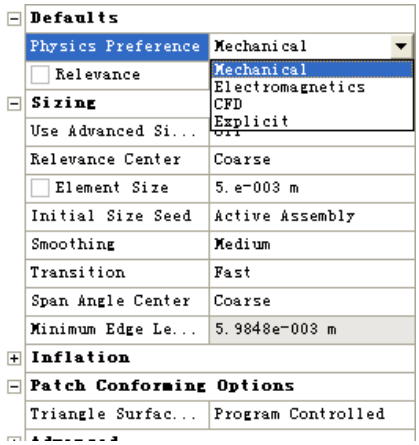


图 1-92　网格划分物理参照设置

对于三维几何来说，ANSYS Mesh 有以下几种不同的网格划分方法：

（1）Automatic（自动网格划分）。

（2）Tetrahedrons（四面体网格划分），当选择此选项时，网格划分又可细分为以下两种方法。

① Patch Conforming 法（Workbench 自带功能）。

- 默认时考虑所有的面和边（尽管在收缩控制和虚拟拓扑时会改变且默认损伤外貌基于最小尺寸限制）。
- 适度简化 CAD（如 Native CAD，Parasolid，ACIS 等）。
- 在多体部件中可能结合使用扫掠方法生成共形的混合四面体/棱柱和六面体网格。
- 有高级尺寸功能。
- 表面网格→体网格。

② Patch Independent 法（基于 ICEM CFD 软件）。

- 对 CAD 有长边的面、许多面的修补、短边等有用。
- 内置 defeaturing/simplification 基于网格技术。
- 体网格→表面网格。

（3）Hex Dominant（六面体主导网格划分），当选择此选项时，Mesh 将采用六面体单元划分网格，但是会包含少量的金字塔单元和四面体单元。

（4）Sweep（扫掠法）。

（5）MultiZone（多区法）。

（6）Inflation（膨胀法）。

对于二维几何体来说，ANSYS Mesh 有以下几种不同的网格划分方法。

（1）Quad Dominant（四边形主导网格划分）。

（2）Triangles（三角形网格划分）。

（3）Uniform Quad/Tri（四边形/三角形网格划分）。

（4）Uniform Quad（四边形网格划分）。

图 1-93 所示为采用 Automatic 网格划分方法得出的网格分布。

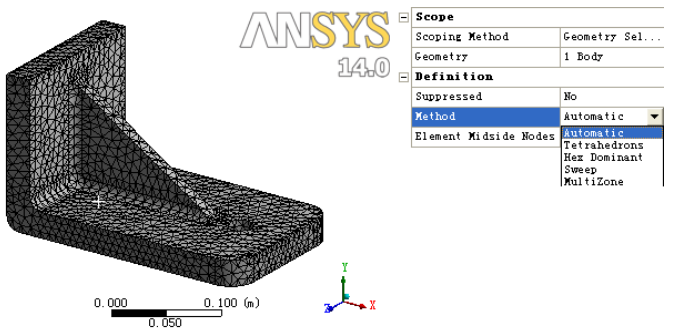


图 1-93　Automatic 网格划分方法

图 1-94 所示为采用 Tetrahedrons 及 Patch Conforming 网格划分方法得出的网格分布。

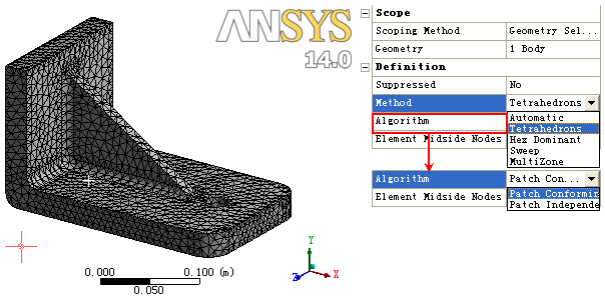


图 1-94　Tetrahedrons 网格划分方法

图 1-95 所示为采用 Tetrahedrons 及 Patch Independent 网格划分方法得出的网格分布。

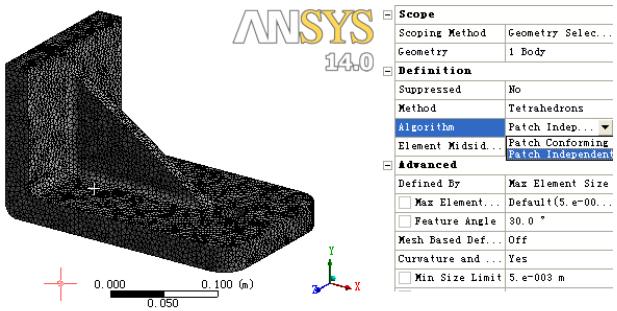


图 1-95　Tetrahedrons 及 Patch Independent 网格划分方法

图 1-96 所示为采用 Hex Dominant 网格划分方法得出的网格分布。

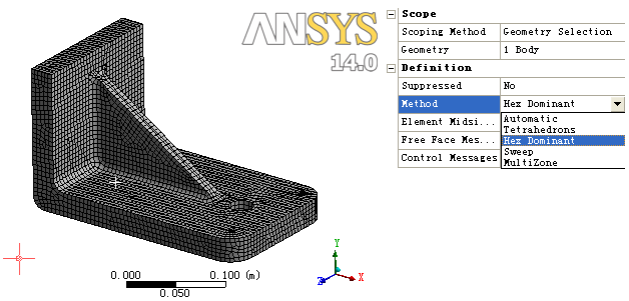


图 1-96　Hex Dominant 网格划分方法

图 1-97 所示为采用 Sweep 法划分的网格模型。

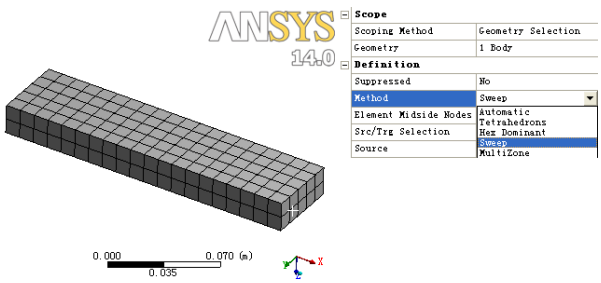


图 1-97　Sweep 网格划分方法

图 1-98 所示为采用 MultiZone 划分的网格模型。

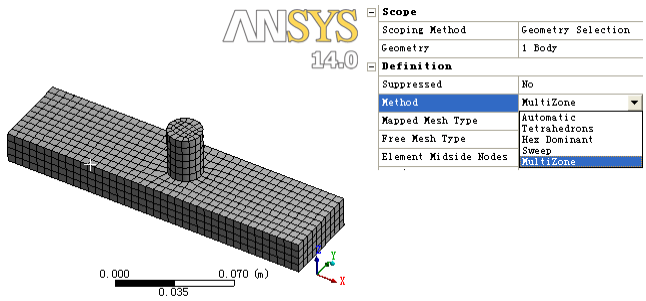


图 1-98　MultiZone 网格划分方法

图 1-99 所示为采用 Inflation 划分的网格模型。

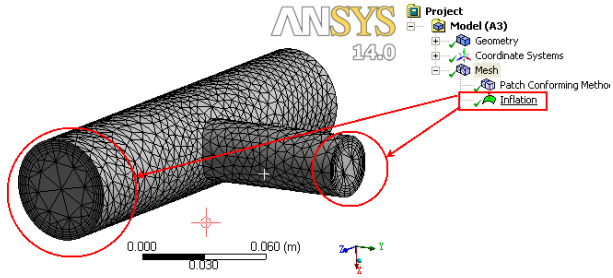


图 1-99　Inflation 网格划分方法

3. Inflation 网格划分实例

Inflation 法一般用于流体动力学分析（CFD）的网格划分，图 1-100 所示为一个简化后的三通流体部分模型，下面采用 Inflation 法对模型进行网格划分。

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 1-101 所示。

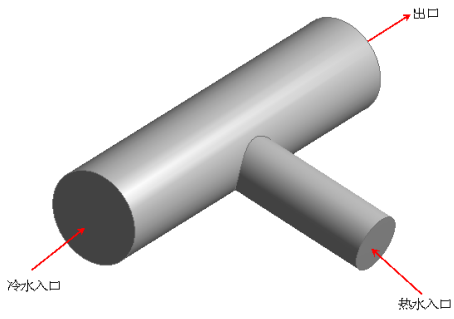


图 1-100　三通模型

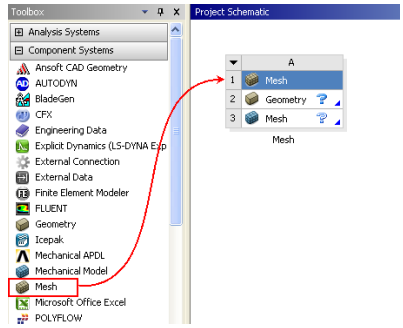


图 1-101　创建分析项目 A

Step3：右击项目 A 中的 A2（Geometry）栏，如图 1-102 所示，在弹出的快捷菜单

中选择 Import Geometry→Browse…命令。

Step4：如图 1-103 所示，在弹出的对话框中选择如下。

① 将文件类型更改为 Parasolid（*.x_t）。

② 选择 santong. x_t 格式文件，然后单击“打开”按钮。

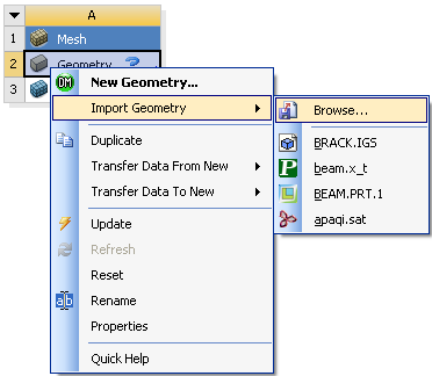


图 1-102　加载几何文件

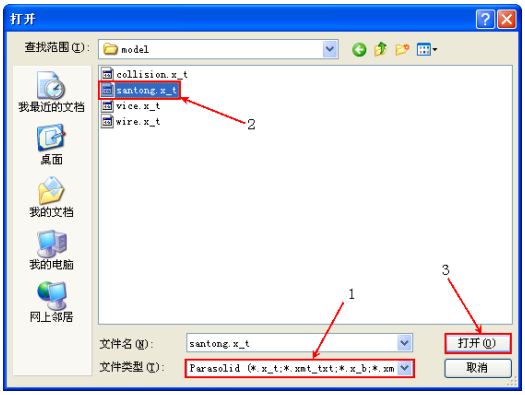


图 1-103　选择文件名

Step5：双击项目 A 中的 A2（Geometry）栏，此时会弹出如图 1-104 所示的 DesignModeler 平台，同时会弹出“单位设置”对话框，在“单位设置”对话框中设置单位为 mm，单击 OK 按钮。

Step6：DesignModeler 平台被加载，同时在 Tree Outline（模型树）中出现一个 Import1选项，如图 1-105 所示，前面的 表示几何模型需要生成。

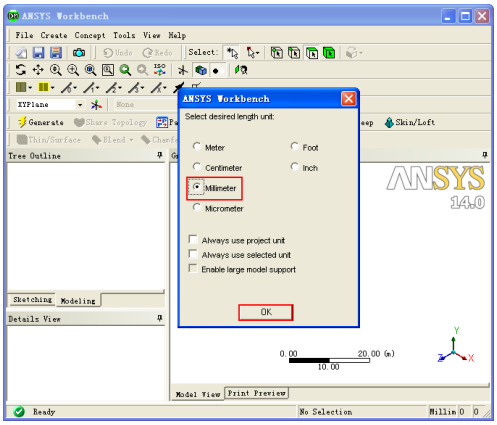


图 1-104　单位设置

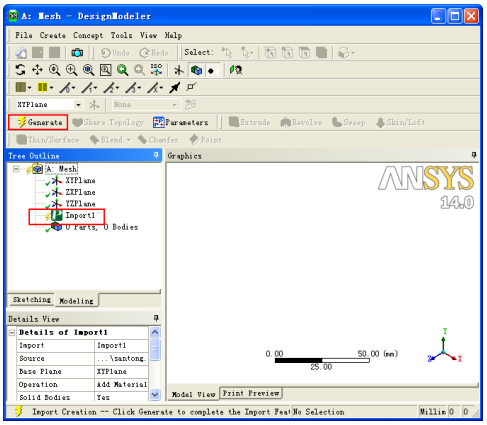


图 1-105　DesignModeler 界面

Step7：单击工具栏中的 General 按钮，如图 1-106 所示，此时会在绘图区中加载几何模型，同时 Tree Outline 中的 Import1会变成 Import1，表示模型成功被加载。

Step8：单击工具栏中的按钮保存文件，在弹出的如图 1-107 所示的“另存为”对话框中输入文件名 santong_mesh，单击“保存”按钮。

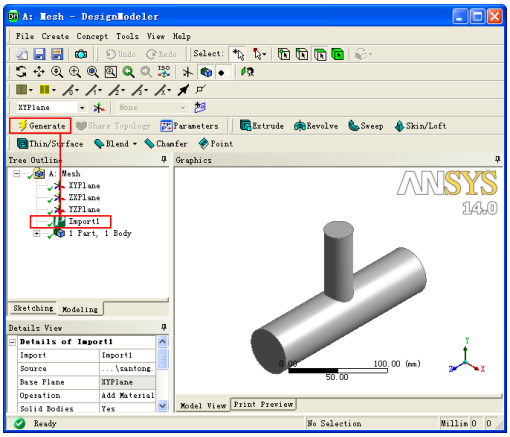


图 1-106　载入几何模型

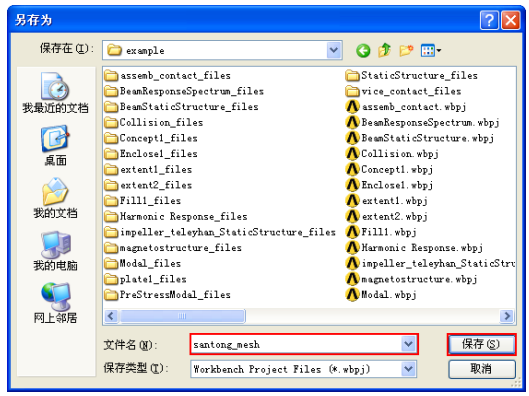


图 1-107　保存文件

Step9：单击 DesignModeler 平台右上角的按钮，关闭软件。

Step10：回到 Workbench 主窗口，如图 1-108 所示，选择 A3（Mesh）栏，在弹出的快捷菜单中选择 Edit…命令。

Step11：Mesh 网格划分平台被加载，如图 1-109 所示。

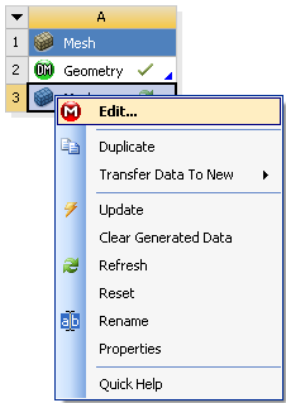


图 1-108　载入 Mesh

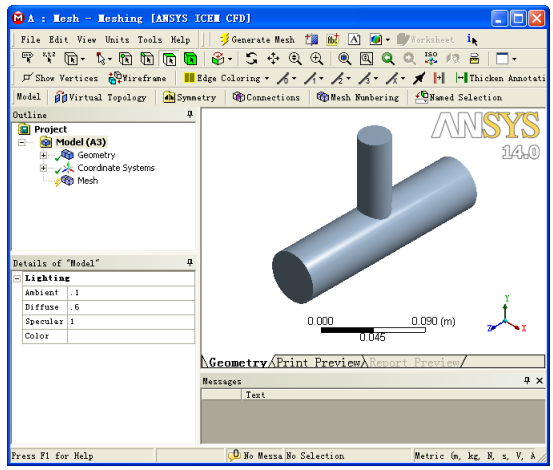


图 1-109　Mesh 平台

Step12：右击 Outline 中的 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出一个“网格设置”快捷菜单，如图 1-110 所示，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Method 命令。

Step13：此时在 Outline 中的 Mesh 下创建一个 Automatic Method 选项，如图 1-111 所示，选择此选项，在下面的 Details of‘Automatic Method’面板中做如下操作。

① 在绘图区选择实体，然后单击 Geometry 栏中的 Apply 按钮确定选择。

② 在 Definition→Method 栏中选择 Tetrahedrons（四面体网格划分）选项。

Step14：右击 Project→Modal（A3）→Mesh→Automatic Method 命令，在弹出如图 1-112 所示的快捷菜单中选择 Insert→Inflation 命令。

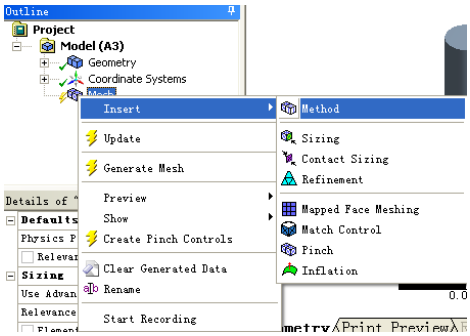


图 1-110　插入网格划分

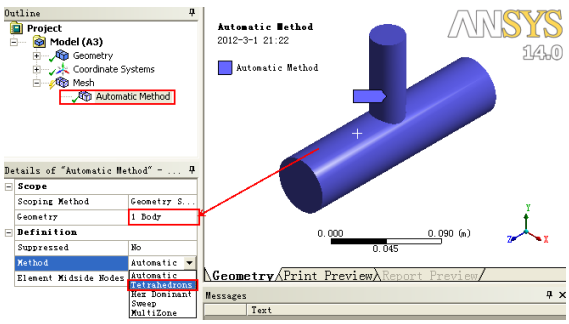


图 1-111　网格划分方法

Step15：此时在 Project→Modal（A3）→Mesh 下面出现一个 Inflation 命令，？表示此命令还未设置。

Step16：选择 Inflation 命令，在如图 1-113 所示的下面出现的 Details of ‘Inflation’ 面板中设置如下。

① 选择几何实体，然后在 Scope→Geometry 栏中单击 Apply 按钮。

② 选择两圆柱的外表面，然后在 Definition→Boundary 栏中单击 Apply 按钮，完成 Inflation（膨胀）面的设置。

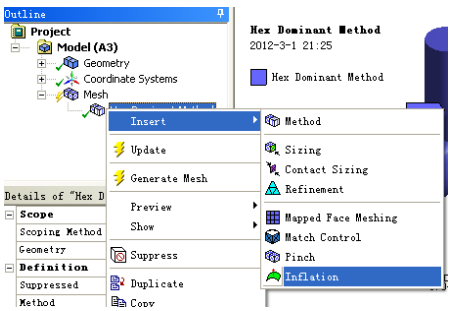


图 1-112　插入 Inflation

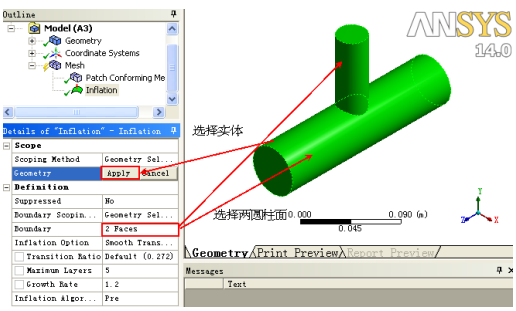


图 1-113　选择几何模型

Step17：选择 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，下面出现了 Details of Mesh 面板，在如图 1-114 所示的面板中设置如下。

在 Sizing→Element Size 栏中输入 0.005，并单击回车键确认输入。

Step18：右击 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，此时弹出如图 1-115 所示的快捷菜单，在菜单中选择 Generate Mesh 命令。

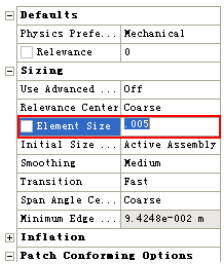


图 1-114　网格尺寸设置

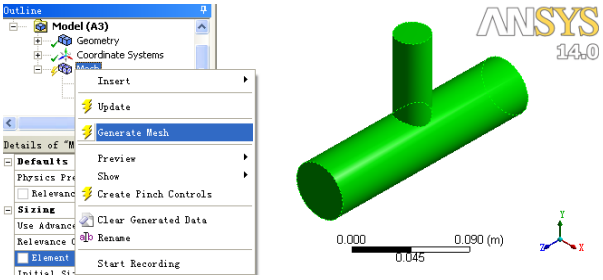


图 1-115　划分网格

Step19：此时会弹出如图 1-116 所示的网格划分进度栏，进度栏中显示出网格划分的进度条。

Step20：划分完成的网格如图 1-117 所示。

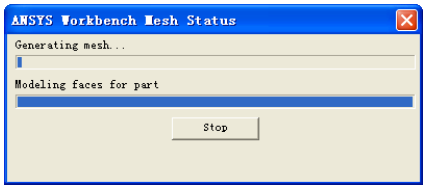


图 1-116　网格划分进度栏

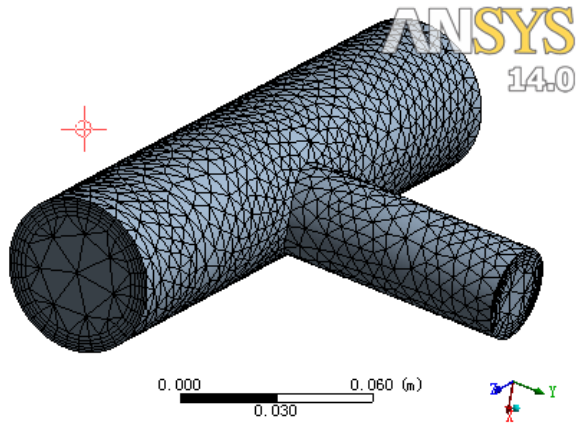


图 1-117　网格模型

Step21：单击工具栏中的面选择过滤器图标，然后右击如图 1-118 所示的面，在弹出的快捷菜单中选择 Create Named Selection（创建选择）命令。

注：此面位于 *Z* 轴最大值侧，请旋转视图位置以方便选择。

Step22：在弹出的如图 1-119 所示的 Selection Name 对话框中输入截面名 Cool_inlet，单击 OK 按钮确定。

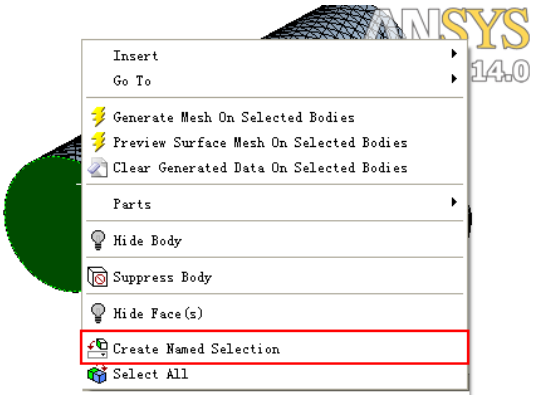


图 1-118　设置截面名

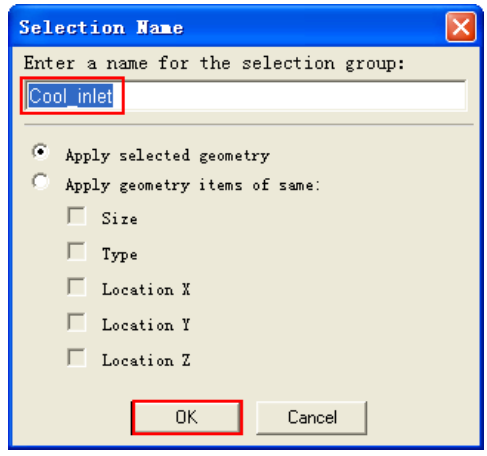


图 1-119　输入截面名

Step23：对另外两个截面做同样设置，设置完成后如图 1-120 所示。

Step24：如图 1-121 所示，选择 Mesh 平台的 File 菜单中的Save Project...子菜单，保存文件，然后退出 Mesh 平台。

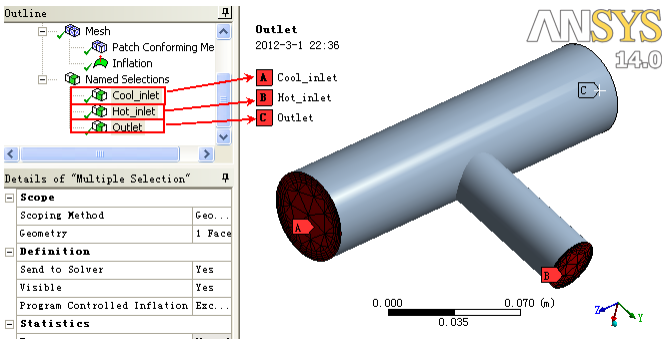


图 1-120　截面命名

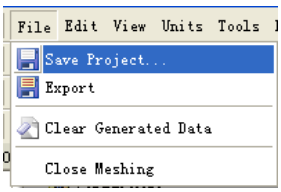


图 1-121　保存文件

4. MultiZone 网格划分实例

MultiZone 法一般用于对几何体多重区域网格划分，图 1-122 所示为一个简化后的模型，采用 MultiZone 法对模型进行网格划分。

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Mesh（网格）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 1-123 所示。

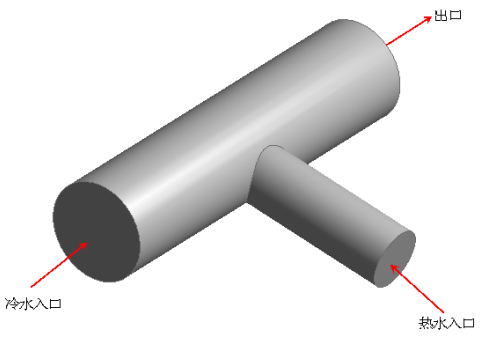


图 1-122　几何模型

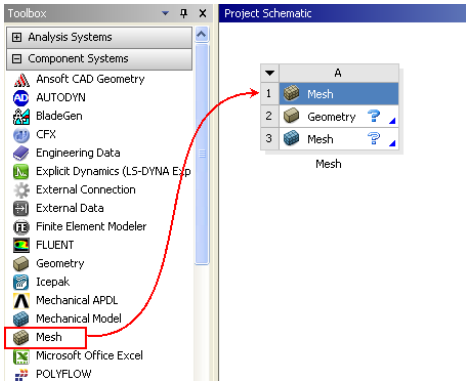


图 1-123　创建分析项目 A

Step3：右击项目 A 中的 A2（Geometry）栏，如图 1-124 所示，在弹出的快捷菜单中选择 New Geometry…命令。

Step4：此时会弹出如图 1-125 所示的 DesignModeler 平台，同时弹出“单位设置”对话框，在“单位设置”对话框中设置单位为 mm，然后单击 OK 按钮。

Step5：选择 Tree Outline 中的 Mesh→XYPlane 命令，如图 1-126 所示，然后单击工具栏中的 按钮，使平面正对屏幕。

Step6：如图 1-127 所示，单击 Sketching（草绘）命令，切换到草绘操作面板，选择 Draw→Rectangle 命令，在图形操作区域草绘一个长方形，左起点为坐标原点。

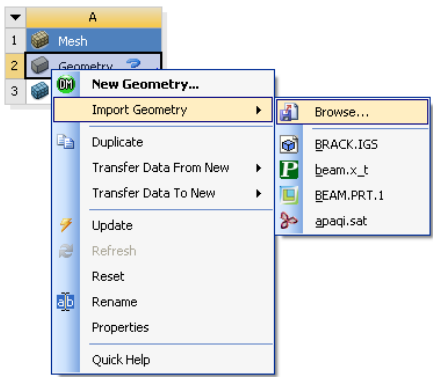


图 1-124　创建几何文件

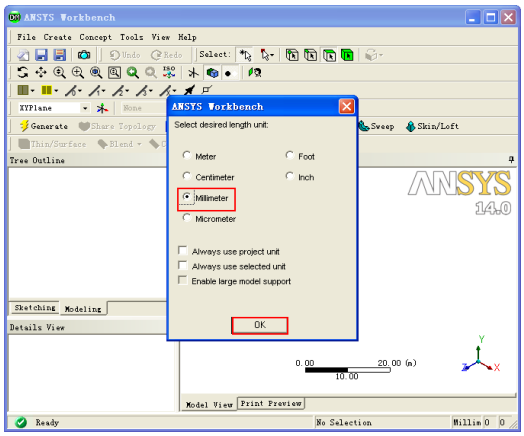


图 1-125　启动 DesignModeler 软件

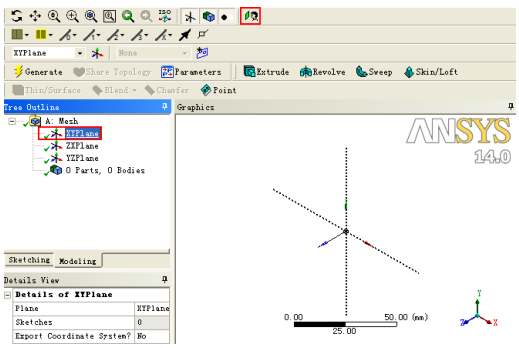


图 1-126　草绘平面

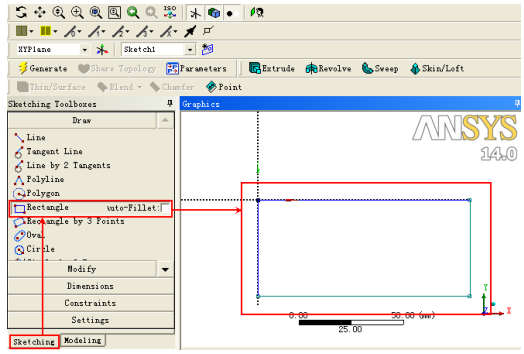


图 1-127　绘图

Step7：选择 Dimension→General 命令，如图 1-128 所示，创建两个标注分别为水平方向的 $H2$ 和竖直方向的 $V1$。

Step8：如图 1-129 所示，在下面弹出的 Detail View 面板中 Dimensions:2 中的 H2 栏输入 150mm，在 V1 栏输入 50mm。

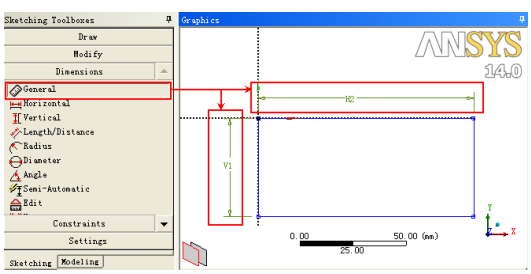


图 1-128　标注

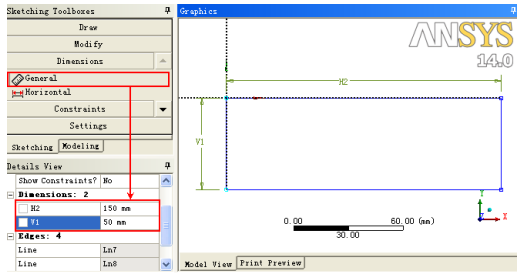


图 1-129　修改尺寸

Step9：如图 1-130 所示，在工具栏中单击 Extrude 按钮，在出现的面板中做如下操作。

① 在 Geometry 栏中选中 Sketch1。

② 在 Extent Type 下面的 Depth 中输入 30mm，即默认值。

③ 单击工具栏中的 Generate 按钮，生成实体几何。

Step10：单击工具栏中的按钮，在绘图区域选择最上端的平面，如图 1-131 所示，此时被选中的平面被加亮。

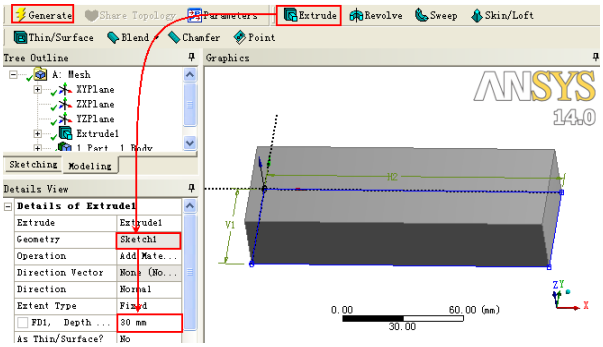


图 1-130　生成实体

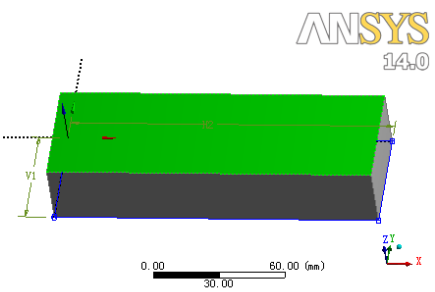


图 1-131　选择平面

Step11：单击 Sketching 选项卡，弹出的如图 1-132 所示草绘操作面板，选择 Draw→Circle 命令草绘圆，在绘图区域草绘一个圆形。

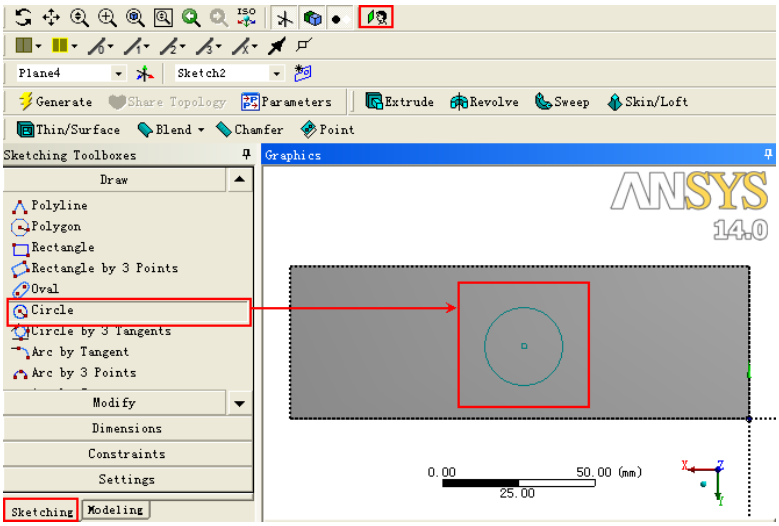


图 1-132　草绘圆

Step12：选择 Dimension→General 命令，如图 1-133 所示，在绘图区域标注圆心到左端的距离 *L*3，圆心到底边的距离 *L*2 及圆形的直径 *D*1。

Step13：如图 1-134 所示，在工具栏中单击 Extrude 按钮，在出现的面板中做如下操作。

① 在 Geometry 栏中选中 Sketch2。

② 在 Extent Type 下面的 Depth 中输入 50mm，即默认值。

③ 单击工具栏中的 Generate 按钮，生成实体几何。

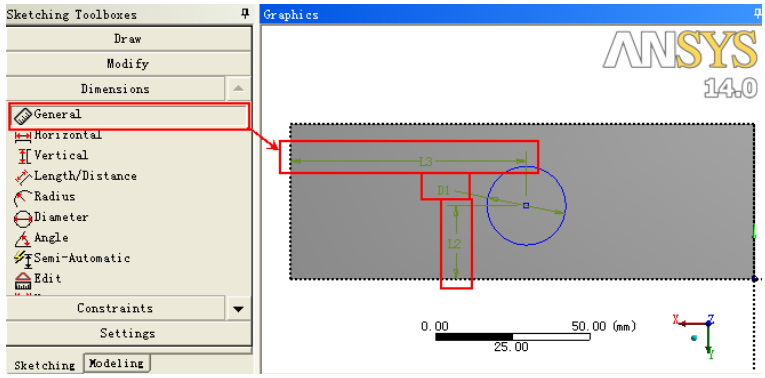


图 1-133　尺寸标注

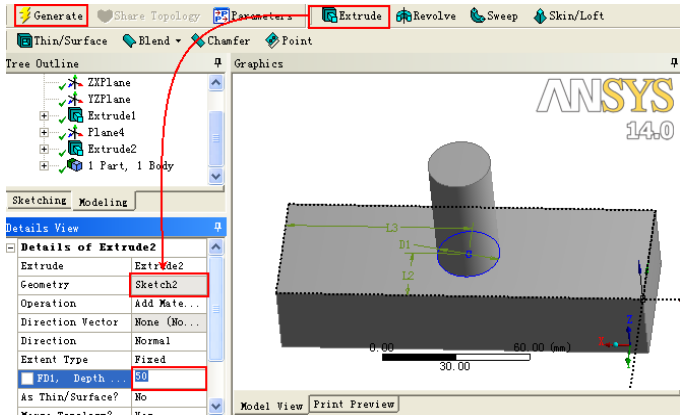


图 1-134　拉伸实体

Step14：单击 DesignModeler 平台右上角的按钮，关闭软件。

Step15：回到 Workbench 主界面中，双击项目 A 中的 A2（Mesh）栏，加载如图 1-135 所示的 Mesh 网格划分平台。

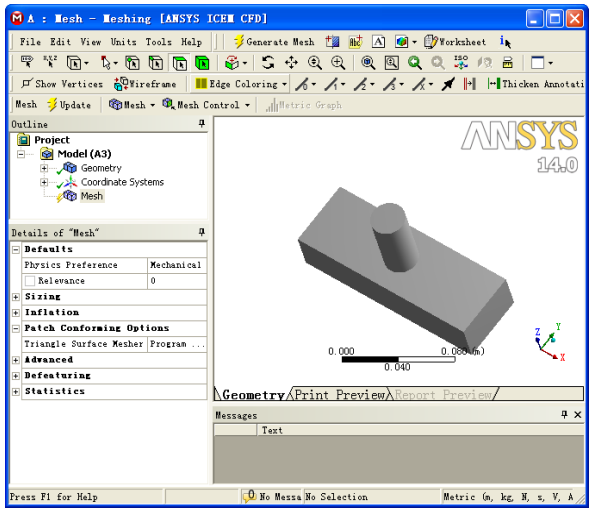


图 1-135　Mesh 网络划分平台

Step16：选择 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，如图 1-136 所示，在出现的 Mesh 工具栏中选择 Mesh Control→Method 命令。

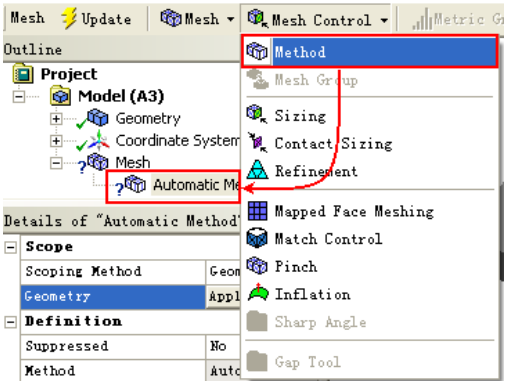


图 1-136　Mesh 设置

Step17：在如图 1-137 所示的 Details of “MultiZone” 面板中做如下设置。

① 在 Geometry 栏中显示 1 Body，表示一个实体被选中。

② 在 Method 栏中选择 MultiZone 选项。

③ 在 Src/Trg Selection 栏中选择 Manual Source 选项。

④ 在 Source 栏中选择圆柱和长方体的三个平行端面，单击 Apply 按钮。

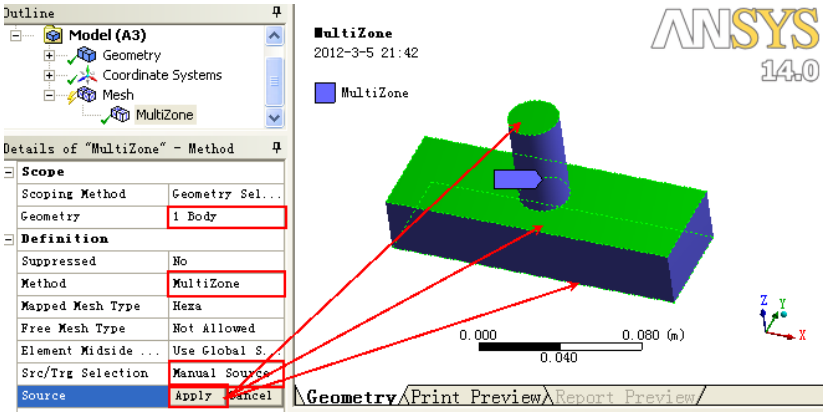


图 1-137　划分网格 1

Step18：选择 Project→Modal（A3）→Mesh 命令，在弹出的如图 1-138 所示的 Details of “Mesh” 面板中设置 Element Size 栏的数值为 5e-003。

Step19：如图 1-139 所示，右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令进行网格划分，如图 1-140 所示为划分完网格的几何模型。

Step20：如图 1-141 所示，选择 Mesh 平台的 File 菜单中的 Save Project... 子菜单，在弹出的“另存为”对话框中输入文件名 MultiZone，单击“保存”按钮保存文件，然后退出 Mesh 平台。

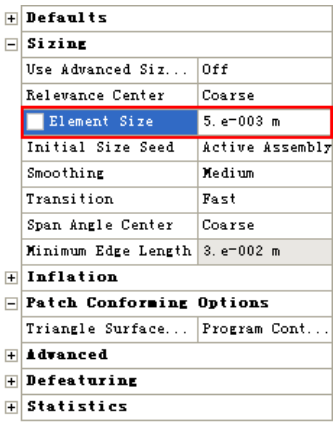


图 1-138　设置网格大小

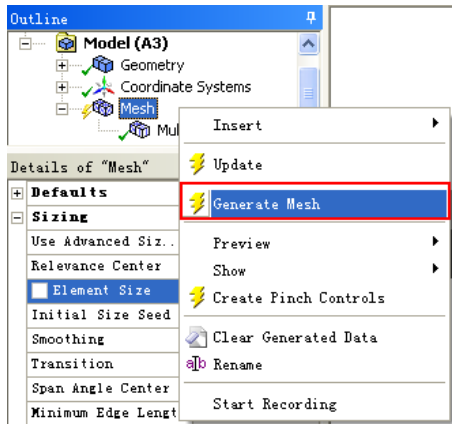


图 1-139　划分网格 2

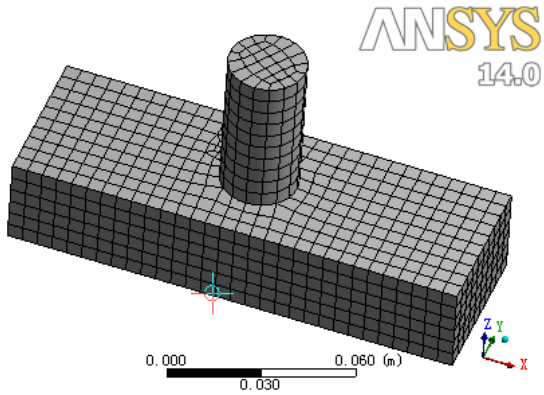


图 1-140　网格模型

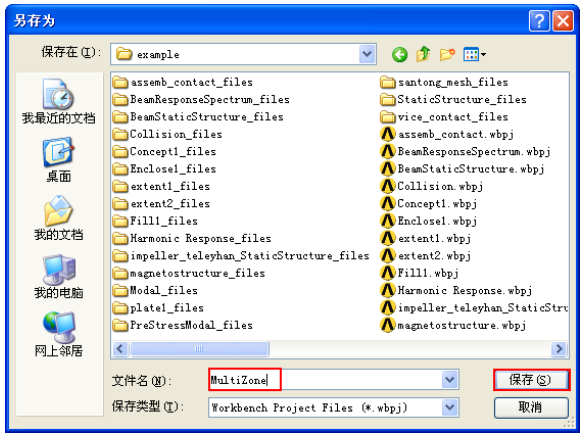


图 1-141　保存文件

1.6 ANSYS Workbench 14.0 其他网格划分工具

ANSYS Workbench 14.0 软件除了自带了强大的几何模型网格划分工具——Mechanical 外，同时还有一些专业的网格划分工具，如 ICEM CFD、TGrid、Gambit 等，这些工具具有非常强大的网格划分能力，同时也能根据不同需要划分出满足不同第三方软件格式的有限元网格，如划分完的网格支持 Abaqus、Nastran 等主流的有限元分析软件的格式。

由于篇幅限制，不能一一讲解，仅将以上三种网格划分软件的基本功能进行简单介绍。

1. ICEM CFD 软件简介

ICEM CFD 是 The Integrated Computer Engineering and Manufacturing code for Computational Fluid Dynamics 的简称，是专业的 CAE 前处理软件。

作为专业的前处理软件，ICEM CFD 为所有世界流行的 CAE 软件提供高效可靠的分析模型。它拥有强大的 CAD 模型修复能力、自动中面抽取、独特的网格“雕塑”技术、网格编辑技术及广泛的求解器支持能力。同时，作为 ANSYS 家族的一款专业分析软件，还可以集成于 ANSYS Workbench 平台，获得 Workbench 的所有优势。

ICEM CFD 软件功能如下所述。

- 直接几何接口（CATIA, CADDS5, ICEM Surf/DDN, I-DEAS, SolidWorks, Solid Edge, Pro/ENGINEER and Unigraphics）。
- 忽略细节特征设置：自动跨越几何缺陷及多余的细小特征。
- 对 CAD 模型的完整性要求很低，提供完备的模型修复工具，方便处理“烂模型”。
- 一劳永逸的 Replay 技术，对几何尺寸改变后的几何模型自动重划分网格。
- 方便的网格雕塑技术实现任意复杂的几何体纯六面体网格划分。
- 快速自动生成六面体为主的网格。
- 自动检查网格质量，自动进行整体平滑处理，坏单元自动重划，可视化修改网格质量。
- 超过 100 种求解器接口，如 FLUENT、Ansys、CFX、Nastran、Abaqus、LS-Dyna ICEMCFD 的网格划分模型。

1）Hexa Meshing 六面体网格

ANSYS ICEM CFD 中六面体网格划分采用了由顶至下的“雕塑”方式，可以生成多重拓扑块的结构和非结构化网格。整个过程半自动化，使用户能在短时间内掌握原本只能由专家进行的操作。采用了先进的 O-Grid 等技术，用户可以方便地在 ICEM CFD 中对非规则几何形状画出高质量的“O”形、“C”形、“L”形六面体网格。

2）Tetra Meshing 四面体网格

四面体网格适合对结构复杂的几何模型进行快速高效的网格划分。在 ICEM CFD 中，四面体网格的生成实现了自动化，系统自动对已有的几何模型生成拓扑结构。用户只需要设定网格参数，系统就可以自动快速地生成四面体网格。系统还提供丰富的工具，使用户能够对网格质量进行检查和修改。

3）Prism Meshing 棱柱型网格

Prism 网格主要用于四面体总体网格中对边界层的网格进行局部细化，或是用在不同形状网格（Hexa 和 Tetra）之间交接处的过渡。跟四面体网格相比，Prism 网格形状更为规则，能够在边界层处提供较好的计算区域。

2. TGrid 软件简介

TGrid 是一款专业的前处理软件，用于在复杂和非常庞大的表面网格上产生非结构化的四面体网格及六面体核心网格。TGrid 提供高级的棱柱层网格产生工具，包含冲突检测和尖角处理的功能。

TGrid 还拥有一套先进的包裹程序，可以在一大组由小面构成的非连续表面基础上生成高质量的、基于尺寸函数的连续三角化表面网格。

TGrid 软件的健壮性及自动化算法节省了前处理时间，产生的高质量网格提供给 ANSYS FLUENT 软件做计算流体动力学分析。

表面或者体网格可以从 GAMBIT、ANSYS 结构力学求解器、CATIA®、I-DEAS®、NASTRAN®、PATRAN®、Pro/ENGINEER®、Hypermesh®等更多软件中直接导入 TGrid。

TGrid 中拥有大量的修补工具，可以改善导入的表面网格质量，快速地将多个部件的网格装配起来。

TGrid 方便的网格质量诊断工具使得对网格大小和质量的检查非常简单。

TGrid 软件功能如下所述。

TGrid 使用笛卡尔悬挂节点六面体、四面体、棱锥体、棱柱体（楔形体或六面体），以及在二维情况下的三角形和四边形等生成先进的混合类型体网格。

- 先进的基于尺寸函数的表面包裹技术，拥有手动或者自动的漏洞修复工具。
- 包裹后的操作有特征边烙印、粗化、区域提取和质量提升工具。
- 棱柱层网格的生成使用包含自动接近率处理的先进边界层方法。
- 产生六面体核心和前沿法四面体体积网格。
- 改善表面网格和体积网格质量的工具。
- 操作表面/单元区域的工具。
- 使用 Delaunay 三角剖分方法进行表面生成和网格重分。
- 生成、交叉、修补、替换和改善边界网格的工具。
- TGrid 可以从 ANSYS 前处理 GAMBIT 导入边界网格，同样也可以从很多第三方前处理工具导入。

3. Gambit 软件功能

Gambit 是为了帮助分析者和设计者建立并网格化计算流体力学（CFD）模型和其他科学应用而设计的一个软件包。

Gambit 通过它的用户界面（GUI）来接受用户的输入。Gambit GUI 简单而又直接地做出建立模型、网格化模型、指定模型区域大小等基本步骤，然而这对很多的模型应用来说已是足够了。

面向 CFD 分析的高质量的前处理器，其主要功能包括几何建模和网格生成。由于 Gambit 本身所具有的强大功能及快速的更新，在目前所有的 CFD 前处理软件中，Gambit 稳居上游。

Gambit 软件具有以下特点。

- ACIS 内核基础上的全面三维几何建模能力，通过多种方式直接建立点、线、面、体，而且具有强大的布尔运算能力，ACIS 内核已提高为 ACIS R12，该功能大大领先于其他 CAE 软件的前处理器。
- 可对自动生成的 Journal 文件进行编辑，以自动控制修改或生成新几何与网格。
- 可以导入 PRO/E、UG、CATIA、Solidworks、ANSYS、PATRAN 等大多数 CAD/CAE 软件所建立的几何和网格。导入过程新增自动公差修补几何功能，以保证 Gambit 与 CAD 软件接口的稳定性和保真性，使得几何质量高，并大大减轻工程师的工作量。
- 新增 PRO/E、CATIA 等直接接口，使得导入过程更加直接和方便。
- 强大的几何修正功能，在导入几何时会自动合并重合的点、线、面；新增几何修正工具条，在消除短边、缝合缺口、修补尖角、去除小面、去除单独辅助线和修补倒角时更加快速、自动、灵活，而且准确保证几何体的精度。
- G/TURBO 模块可以准确而高效地生成旋转机械中的各种风扇及转子、定子等的几何模型和计算网格。
- 强大的网格划分能力，可以划分包括边界层等 CFD 特殊要求的高质量网格。Gambit 中专用的网格划分算法可以保证在复杂的几何区域内直接划分出高质量的四面体、六面体网格或混合网格。
- 先进的六面体核心（HEXCORE）技术是 Gambit 所独有的，集成了笛卡尔网格和非结构网格的优点，使用该技术划分网格时更加容易，而且大大节省网格数量、提高网格质量。
- 居于行业领先地位的尺寸函数（Size Function）功能可使用户能自主控制网格的生成过程及在空间上的分布规律，使得网格的过渡与分布更加合理，最大限度地满足 CFD 分析的需要。
- Gambit 可高度智能化地选择网格划分方法，可对极其复杂的几何区域划分出与相邻区域网格连续的完全非结构化的混合网格。
- 新版本中增加了新的附面层网格生成器，可以方便地生成高质量的附面层网格。
- 可为 FLUENT、POLYFLOW、 FIDAP、ANSYS 等解算器生成和导出所需要的网格和格式。

1.7 本章小结

本章首先简单介绍了 ANSYS Workbench 14.0 版本软件的常见模块，与 Pro/E（Croe）软件集成设置，以及用 DesignModeler 进行简单几何建模和用 Mechanical 进行网格划分等操作。

通过对本章节的学习，读者应能够熟练地进行几何建模、网格划分，同时也应该熟练掌握与 CAD 软件集成的设置方法与技巧。

读者通过学习对不同的网格划分软件应有一定的了解。

第 2 章

结构静力学分析及实例详解

结构静力学分析是有限元分析中最简单同时也是最基础的分析方法，在日常生活中也是应用最为广泛的分析方式。

本章将对 ANSYS Workbench 软件的结构静力学分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对结构静力学分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握外部几何数据导入方法，包括 ANSYS Workbench 软件支持的几何数据格式。

（2）熟练掌握 ANSYS Workbench 材料赋予的方法。

（3）熟练掌握 ANSYS Workbench 网格划分操作步骤。

（4）熟练掌握 ANSYS Workbench 边界条件的设置与后处理的设置。

2.1 线性静力分析简介

线性静力分析是最基本但又是应用最广的一类分析类型。

线性分析有两方面的含义：首先就是材料为线性，应力应变关系为线性，变形是可恢复的，另外，结构发生的是小位移、小应变、小转动，结构刚度不因变形而变化。

1. 线性静力分析

静力就是结构受到静态荷载的作用，惯性和阻尼可以忽略，在静态载荷作用下，结构处于静力平衡状态，此时必须充分约束，但由于不考虑惯性，则质量对结构没有影响。

ANSYS Workbench 14.0 的线性静力分析可以将多种载荷组合到一起进行分析。图 2-1 所示为 ANSYS Workbench 14.0 平台进行静力分析的项目流程图，其中项目 A 为利用 Samcef 软件求解器进行静力分析流程卡，项目 B 为利用 ANSYS 软件自带求解器进行静力分析流程卡。

在项目 A 中有 A1～A7 共七个表格（如同 Excel 表格），从上到下依次设置即可完成一个静力分析过程。

（1）A1 

：静力分析求解器类型，即求解的类型和求解器的类型。

（2）A2 Engineering Data ：工程数据，即材料库，从中可以选择和设置工程材料。

（3）A3 Geometry ：几何数据，即几何建模工具或者导入外部几何数据平台。

（4）A4 Model ：前处理，即几何模型材料赋予和网格设置与划分平台。

（5）A5 Setup ：有限元分析，即求解计算有限元分析模型。

（6）A6 Solution ：后处理，即完成应力分布及位移响应等云图的显示。

（7）A7 Results ：分析结果，即完成分析的结果。

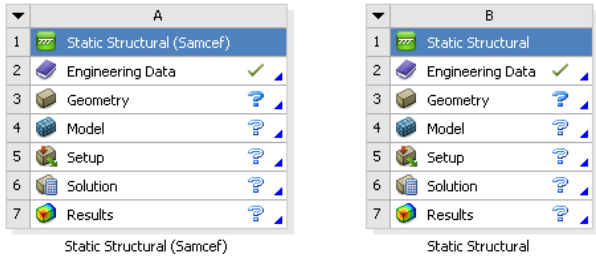


图 2-1　静力分析流程 1

2. 线性静力分析流程

图 2-2 所示为静力分析流程，每个表格右侧都有一个提示符号，如对号（√）、问号（？）等，如图 2-3 所示为在流程分析过程遇到的各种提示符号及解释。

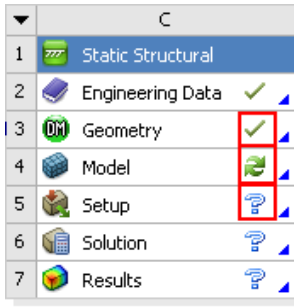


图 2-2　静力分析流程 2

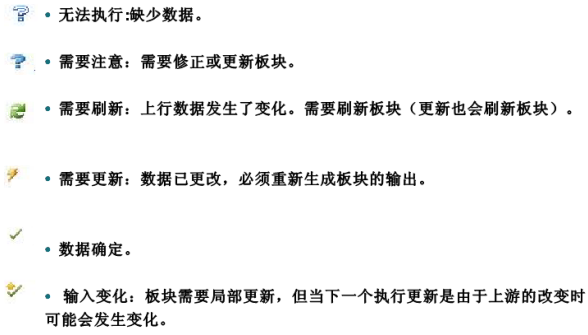


图 2-3　提示符号含义及解释

3. 线性静力分析基础

经典力学理论可知，物体的动力学通用方程为

$$[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}''\}+[\boldsymbol{C}]\{\boldsymbol{x}'\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{F}(t)\} \tag{2-1}$$

式中，$[\boldsymbol{M}]$ 是质量矩阵；$[\boldsymbol{C}]$ 是阻尼矩阵；$[\boldsymbol{K}]$ 是刚度矩阵；$\{\boldsymbol{x}\}$ 是位移矢量；$\{\boldsymbol{F}(t)\}$ 是力矢量；$\{\boldsymbol{x}'\}$ 是速度矢量；$\{\boldsymbol{x}''\}$ 是加速度矢量。而现行结构分析中，与时间 t 相关的量都将被忽略，于是上式简化为

$$[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{F}\} \tag{2-2}$$

下面通过几个简单的实例介绍一下静力分析的方法和步骤。

2.2 项目案例 1——实体静力分析

本节主要介绍用 ANSYS Workbench 的 DesignModeler 模块外部几何模型导入功能，并对其进行静力分析。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 的 DesignModeler 模块外部几何模型导入的方法，了解 DesignModeler 模块支持外部几何模型文件的类型。

（2）掌握 ANSYS Workbench 实体单元静力学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ chair.stp
结果文件	光盘\example\StaticStructure.wbpj

1. 问题描述

如图 2-4 所示为某旋转座椅模型，请用 ANSYS Workbench 分析如果人坐到座椅上，座椅的位移与应力分布，假设人对座椅的均布载荷为 q =9404Pa。



图 2-4 座椅模型

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems →Static Structural（静态结构分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 2-5 所示。

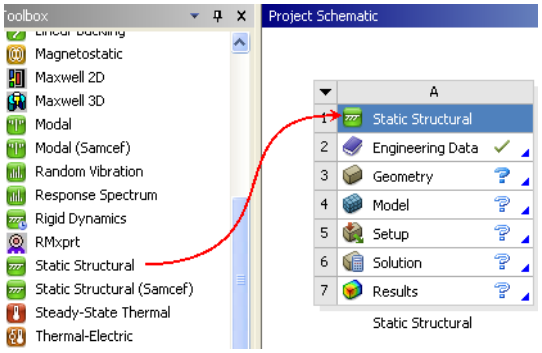


图 2-5 创建分析项目 A

3. 导入创建几何体

Step1：在 A3（Geometry）上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 2-6 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 chair.stp 几何体文件，如图 2-7 所示，此时 A3（Geometry）后的 变为，表示实体模型已经存在。

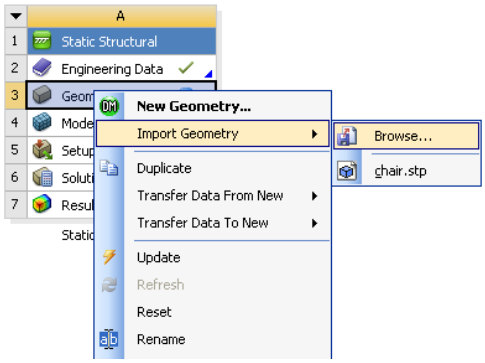


图 2-6　导入几何体

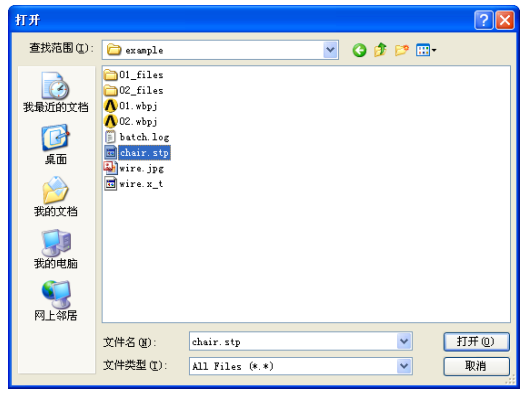


图 2-7　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A3（Geometry）栏，此时会进入 DesignModeler 界面，此时设计树中 Import1 前显示，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 2-8 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 2-9 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

Step5：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回 Workbench 主界面。

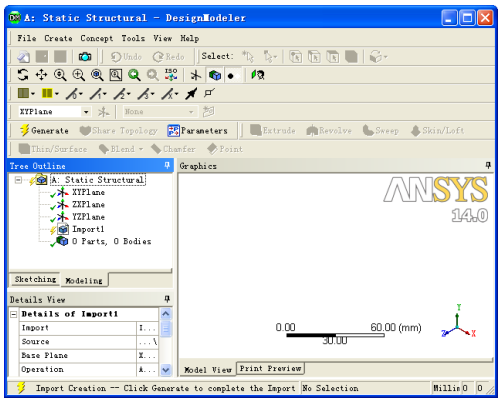


图 2-8　生成前的 DesignModeler 界面

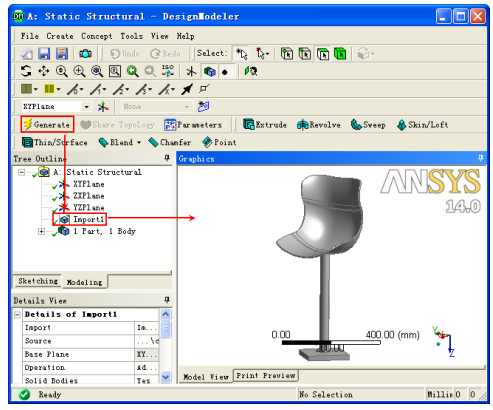


图 2-9　生成后的 DesignModeler 界面

4. 添加材料库

Step1：双击项目 A 中的 A2（Engineering Data）选项，进入如图 2-10 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

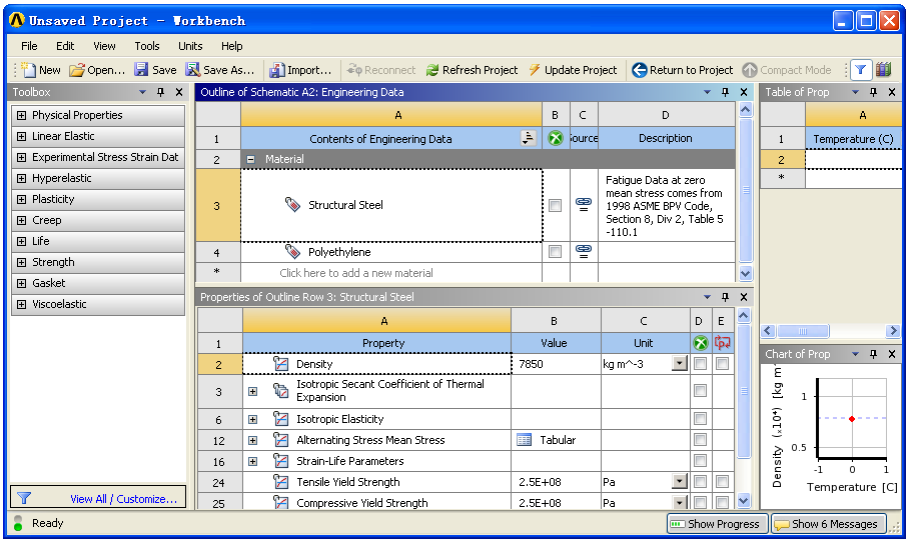


图 2-10　材料参数设置界面

Step2：在界面的空白处右击，弹出的快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 2-11 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

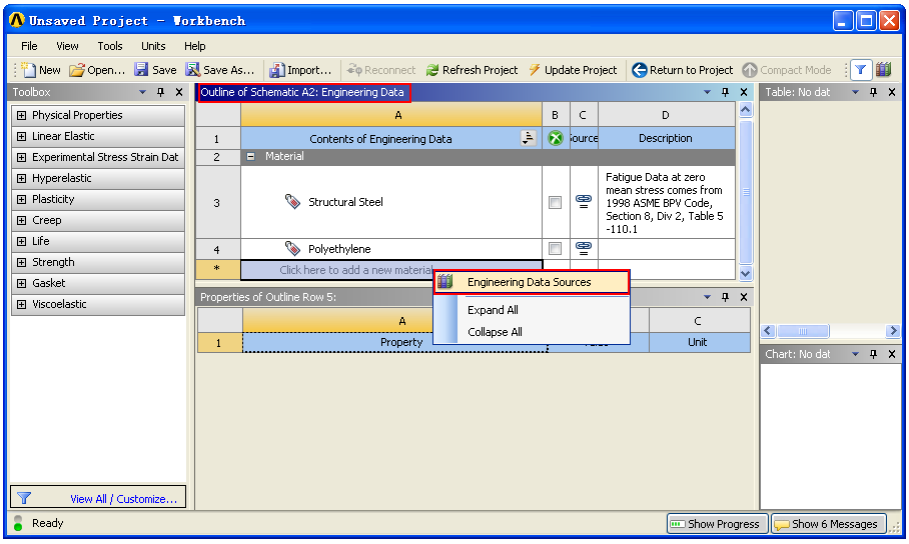


图 2-11　材料参数设置界面

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A10 栏 Polyethylene（聚乙烯）后的 B10 栏的（添加）按钮，此时在 C10 栏中会显示（使用中的）标识，如图 2-12 所示，标识材料添加成功。

Step4：同步骤 Step2，在界面的空白处右击，在弹出的快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 2-13 所示，本实例采用的是默认值。

提 示

用户也可以通过在 Engineering Data 窗口自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会涉及，本实例不介绍。

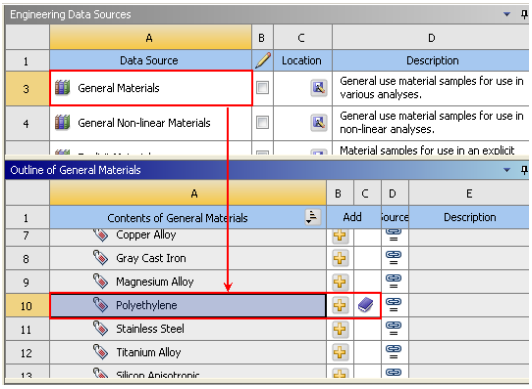


图 2-12　添加材料

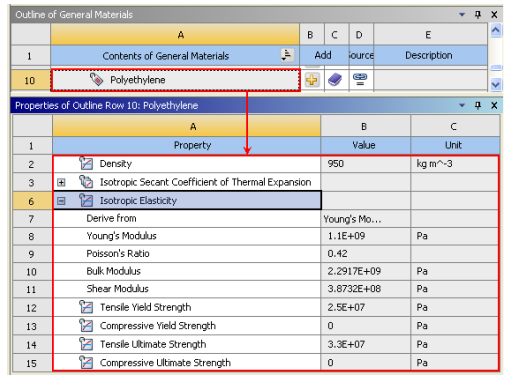


图 2-13　材料参数修改窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

5. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏 Model 选项，进入如图 2-14 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

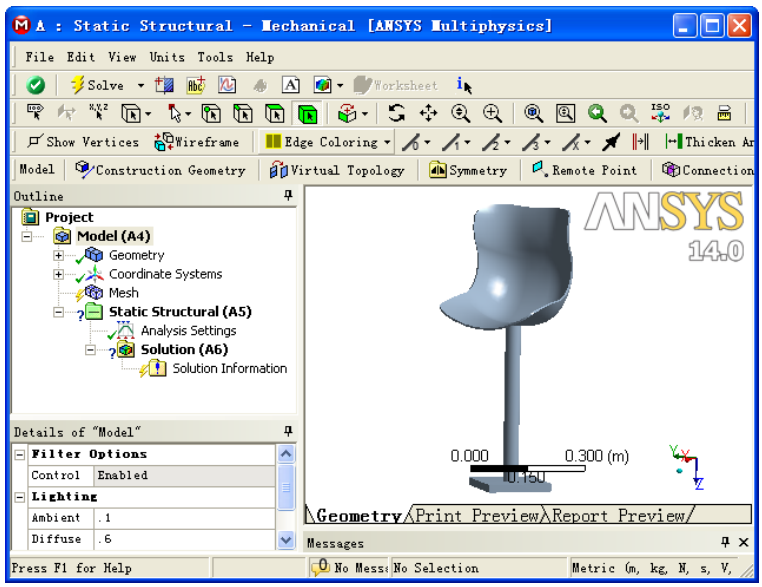


图 2-14　Mechanical 界面

提 示

此时分析树 Geometry 前显示问号?，表示数据不完全，需要输入完整的数据。本例是因为没有为模型添加材料的缘故。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中 Geometry 选项下的 CHAIR，此时即可在 Details of "CHAIR"（参数列表）中给模型添加材料，如图 2-15 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 后的按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Stainless Steel，选择即可将其添加到模型中去。此时分析树 Geometry 前的?变为✓，如图 2-16 所示，表示材料已经添加成功。

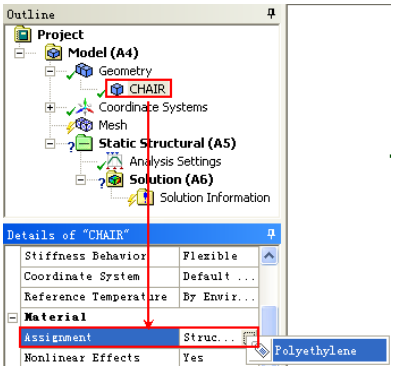


图 2-15　添加材料

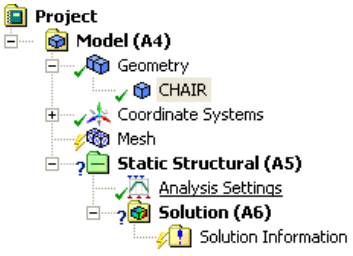


图 2-16　添加材料后的分析树

6. 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，本例在 Sizing 中的 Element Size 中设置为 5.e-003m，其余采用默认设置。

Step2：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 2-17 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 2-18 所示。

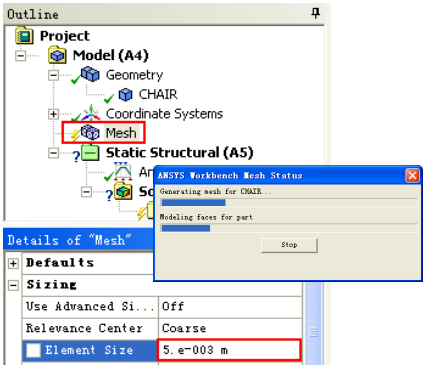


图 2-17　生成网格



图 2-18　网格效果

7. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项，此时会出现如图 2-19 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 2-20 所示。

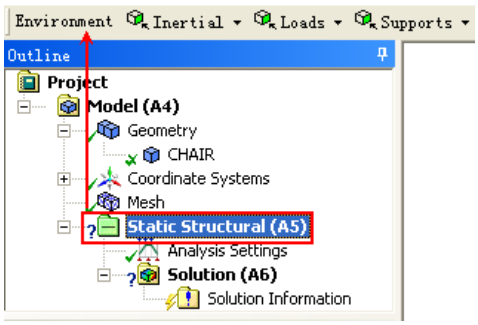


图 2-19　Environment 工具栏

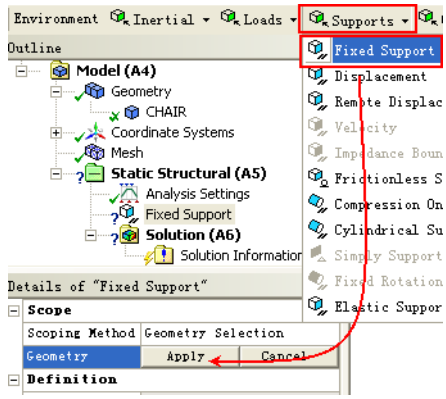


图 2-20　添加固定约束

Step3：选择 Fixed Support 选项，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of "Fixed Support"（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 2-21 所示。

Step4：如同 Step2 选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Pressure（压力）命令，此时在分析树中会出现 Pressure 选项，如图 2-22 所示。

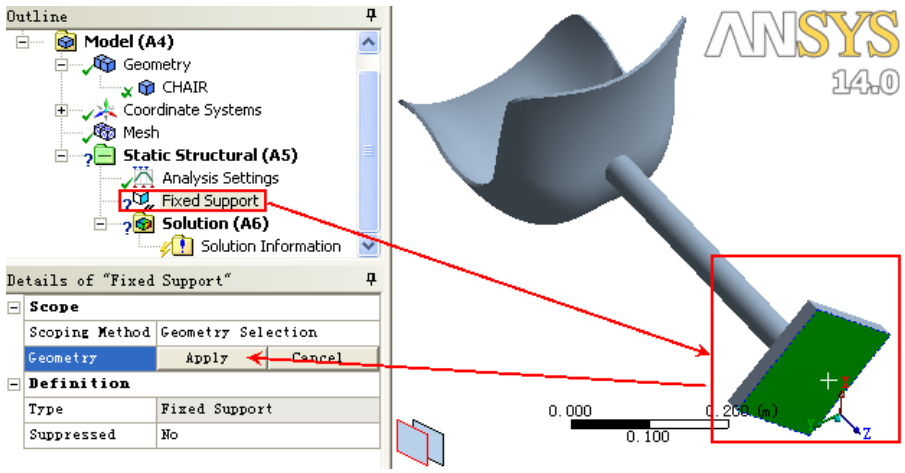


图 2-21　施加固定约束

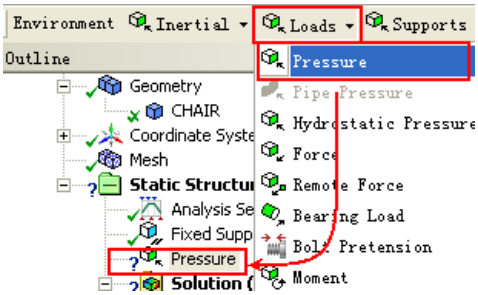


图 2-22　添加压力

Step5：如同 Step3 选择 Pressure 选项，选择需要施加压力的面，单击 Details of "Pressure"（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，同时在 Magnitude 选项下设置压力为 9404Pa 的面载荷，如图 2-23 所示。

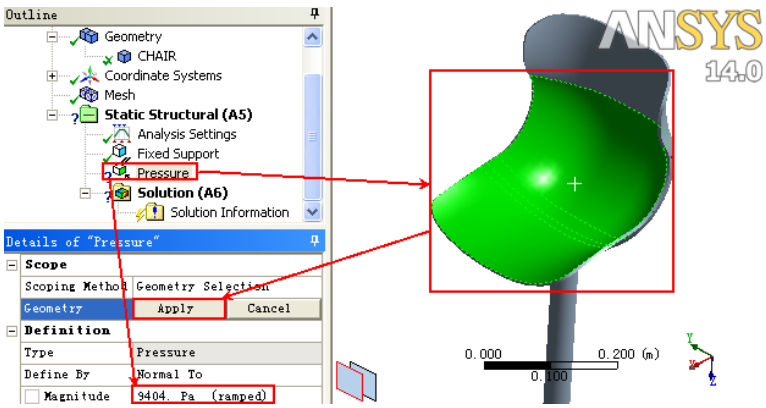


图 2-23　添加面载荷

Step6：在 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 2-24 所示。

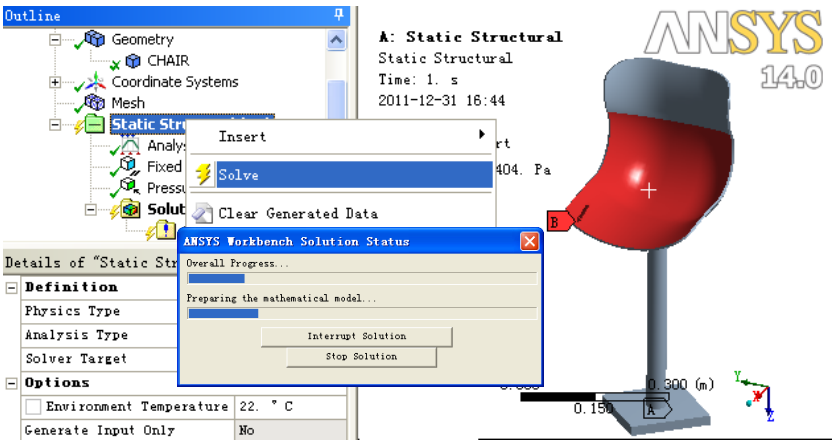


图 2-24　求解过程界面

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现如图 2-25 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Stress（应力）→Equivalent（von-Mises）命令，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项，如图 2-26 所示。

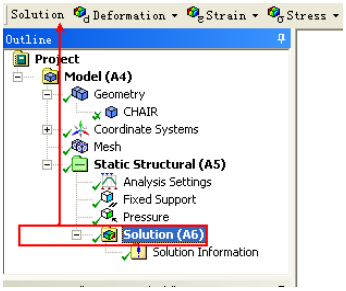


图 2-25　Solution 工具栏

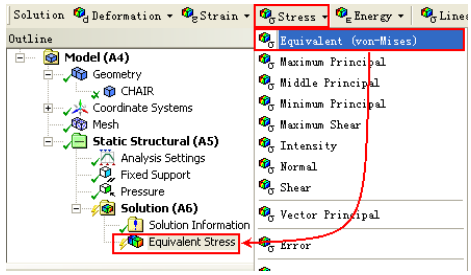


图 2-26　添加等效应力选项

Step3：如同 Step2 选择 Solution 工具栏中的 Strain（应变）→Equivalent（von-Mises）命令，如图 2-27 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent Elastic Strain（等效应变）选项。

Step4：如同 Step2 选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 2-28 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

Step5：在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡Evaluate All Results 命令，如图 2-29 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

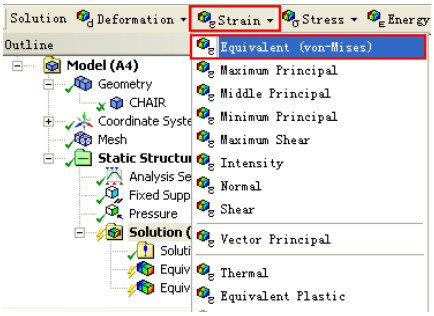


图 2-27　添加等效应变选项

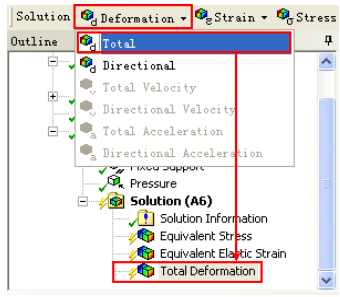


图 2-28　添加总变形选项

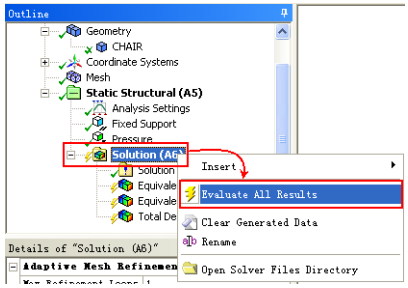


图 2-29　快捷菜单

Step6：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Equivalent Stress 选项，此时会出现如图 2-30 所示的应力分析云图。

Step7：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Equivalent Elastic Strain 选项，此时会出现如图 2-31 所示的应变分析云图。

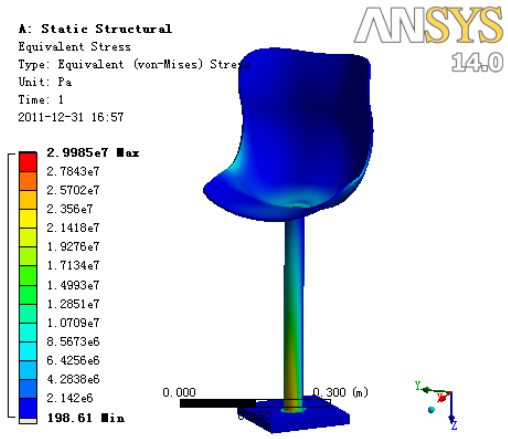


图 2-30　应力分析云图

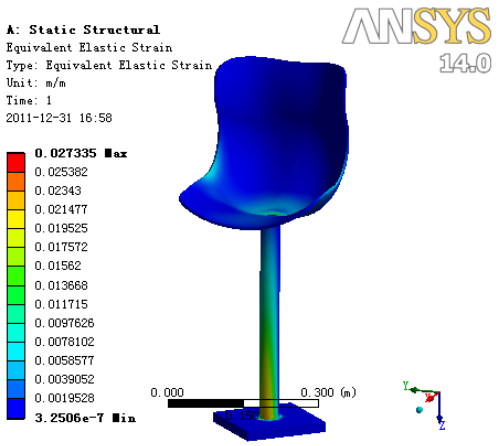


图 2-31　应变分析云图

Step8：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 2-32 所示的总变形分析云图。

9. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 2-33 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

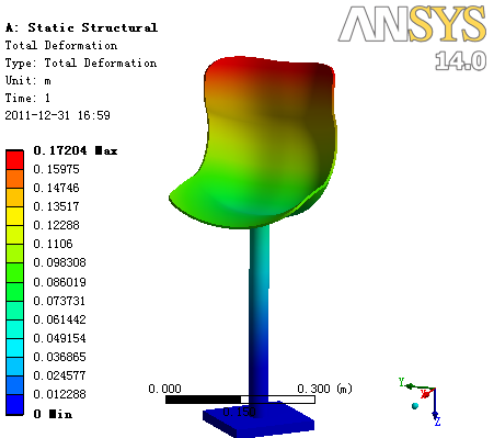


图 2-32　总变形分析云图



图 2-33　项目管理区中的分析项目

2.3 项目案例 2——梁单元线性静力分析

本节主要介绍用 ANSYS Workbench 的 DesignModeler 模块建立梁单元，并对其进行静力分析。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 的 DesignModeler 梁单元模型建立的方法。

（2）掌握 ANSYS Workbench 梁单元静力学分析的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	光盘\example\BeamStaticStructure.wbpj

1. 问题描述

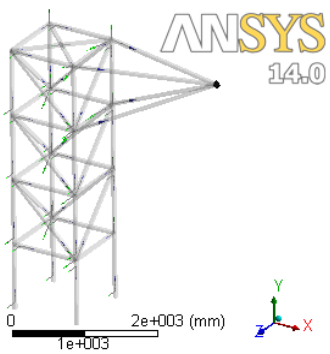


图 2-34 塔架模型

图 2-34 所示是一个工程上用的塔架模型，请用 ANSYS Workbench 建模并分析如果右侧的顶点上作用力 *Fx*=20000N，*Fy*=−50000N，塔架所受的内力及变形情况。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 2-35 所示。

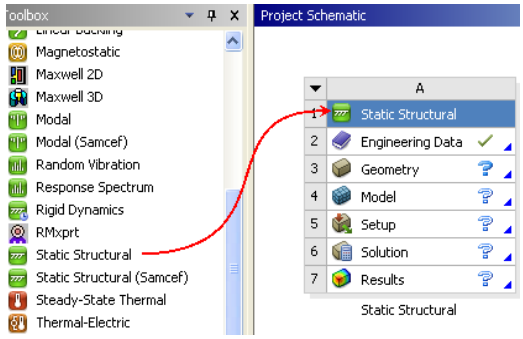


图 2-35 创建分析项目 A

3. 创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上双击，此时会弹出如图 2-36 所示的 DesignModeler 软件窗

口，选择 Meter 选项，然后单击 OK 按钮。

Step2：如图 2-37 所示，单击 XYPlane 按钮选择绘图平面，然后再单击 按钮，使得绘图平面与绘图区域平行。

Step3：在 Tree Outline 下面单击 Sketching 按钮，此时，会出现如图 2-38 所示的 Sketching Toolboxes（草绘工具箱），草绘所有命令都在 Sketching Toolbox（草绘工具箱）中。

Step4：单击 Line （线段）按钮，此时按钮变成 Line 的凹陷状态，表示本命令已被选中，将鼠标移动到绘图区域中的 *X* 轴上，此时会出现一个 C 提示符，表示创建的第一点是在坐标轴上，如图 2-39 所示。

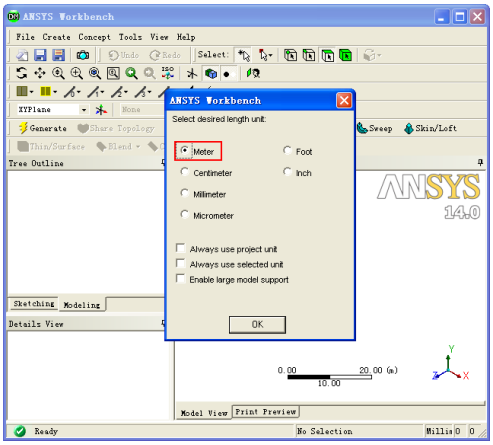


图 2-36　创建几何体

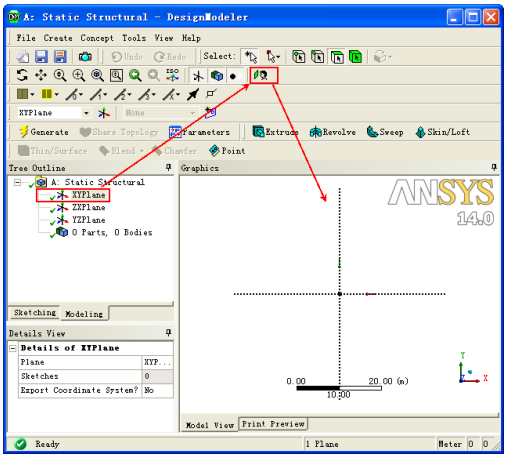


图 2-37　选择绘图平面

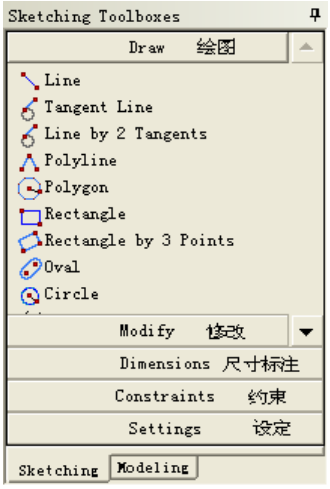


图 2-38　草绘工具箱

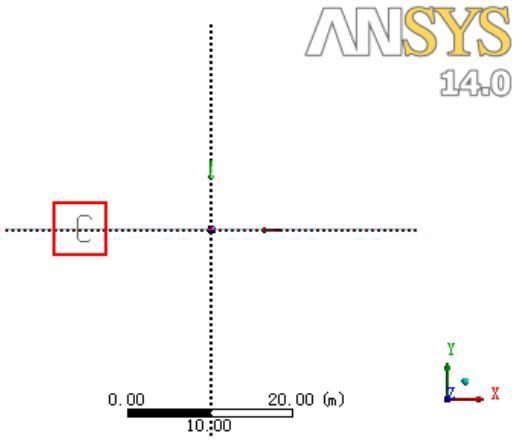


图 2-39　草绘

Step5：当出现 C 提示符后，单击在 *X* 轴上创建第一点，然后向上移动鼠标，此时会出现一个 V 的提示符，表示所绘制的线段是竖直的线段，如图 2-40 所示，单击鼠标完成第一条线段的建立。

注 意

绘制直线时，如果在绘图区域出现了 V（竖直）或 H（水平）提示符，则说明绘制完的直线为竖直或者水平。

Step6：移动鼠标到刚绘制完的线段上端，此时会出现如图 2-41 所示的 P 提示符，说明下一个线段的起始点与这点重合，当 P 提示符出现后，单击确定第一点位置。

Step7：向右移动鼠标，此时会出现如图 2-42 所示的 H 提示符，说明要绘制的线段是水平方向的。

Step8：跟以上操作相同，绘制如图 2-43 所示的另外一条线段。

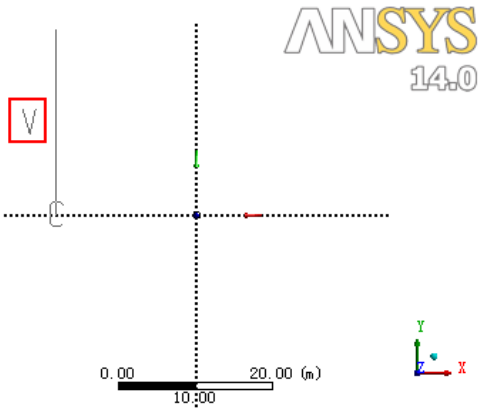


图 2-40　竖直提示符

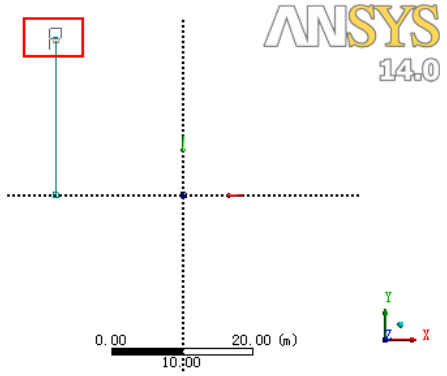


图 2-41　点重合提示符

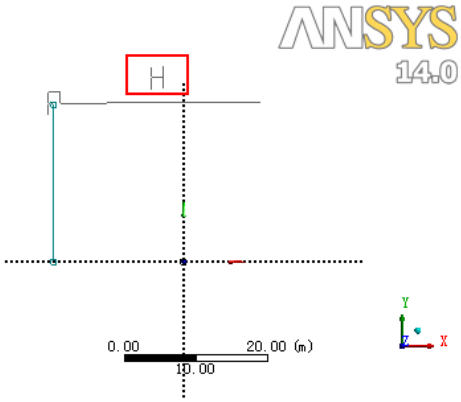


图 2-42　水平提示符

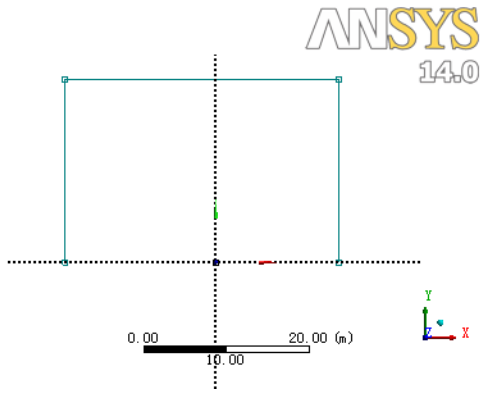


图 2-43　绘制线段

Step9：在 Sketching Toolbox（草绘工具箱）中单击 Dimensions（尺寸标注）按钮，此时工具箱会出现如图 2-44 所示命令栏，并单击 General 按钮。

Step10：单击图 2-45 中最左侧那条竖直线段，然后移动鼠标并单击，此时会出现如图 2-45 所示的尺寸标注。

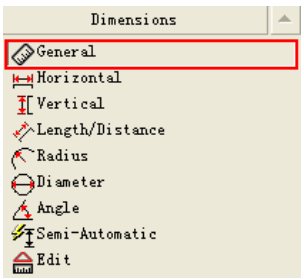


图 2-44　尺寸标注面板

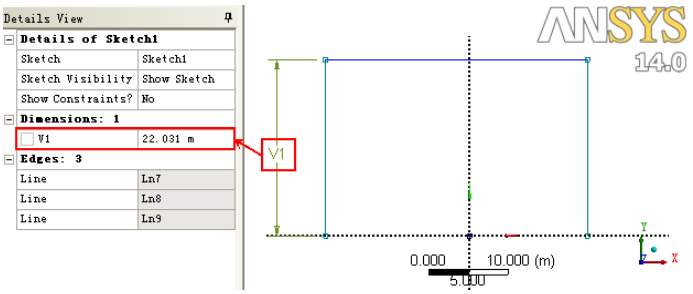


图 2-45　尺寸标注

Step11：同样操作标注如图 2-46 所示的尺寸。

Step12：在如图 2-46 所示的 Details View 下面的 Dimensions:3 中，做如下修改。

*H*2=1m，*H*4=0.5m，*V*1=1m，单击工具栏中的 Generate 按钮生成尺寸设定如图 2-47 所示。

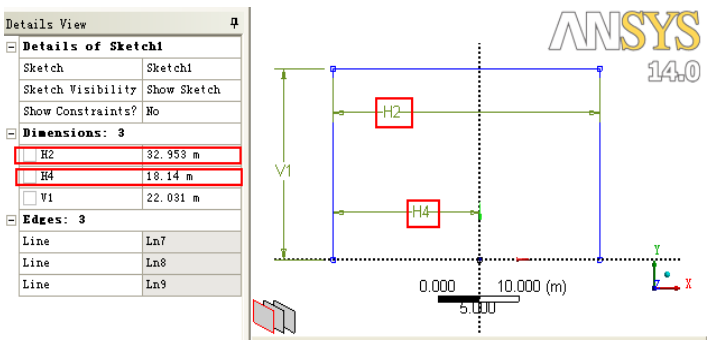


图 2-46　尺寸标注

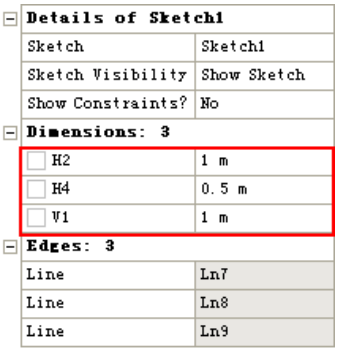


图 2-47　尺寸修改

Step13：用同样操作完成如图 2-48 所示的模型绘制并更改尺寸。

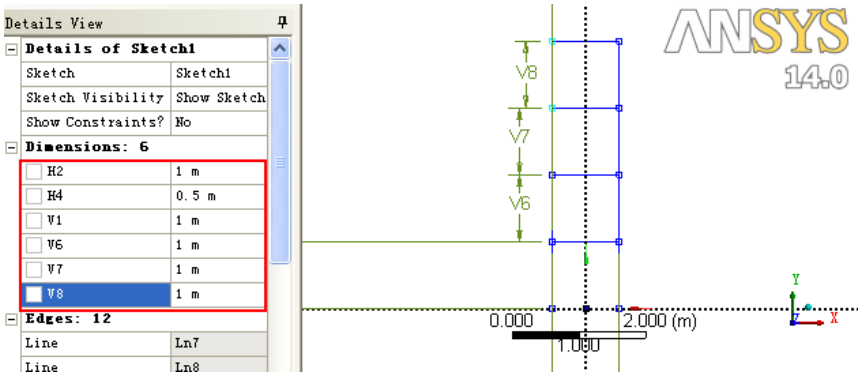


图 2-48　尺寸标注

Step14：如图 2-49 所示，单击 Modeling 按钮，并单击工具栏上的按钮，创建一个新平面，此时，会在 Tree Outline 的 A:Static Structural 下面新增了一个 Plan5。

Step15：如图 2-50 所示，在 Details of View 面板中的 Details of Plane5 中做如下设定，即设置 Type 为 From Plane，设置 Base Plane 为 XYPlane，设置 Transform1（RMB）为

Offset Z，设置 FD1,Value 1 为 1m。单击工具栏中的 Generate 按钮，生成新平面。

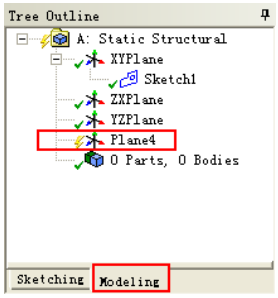


图 2-49　创建新平面

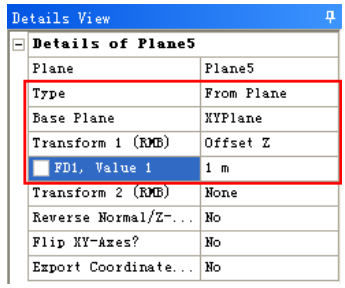


图 2-50　设定新平面

Step16：在 Plane5 上绘制如上所述的线条，绘制完成后如图 2-51 所示。

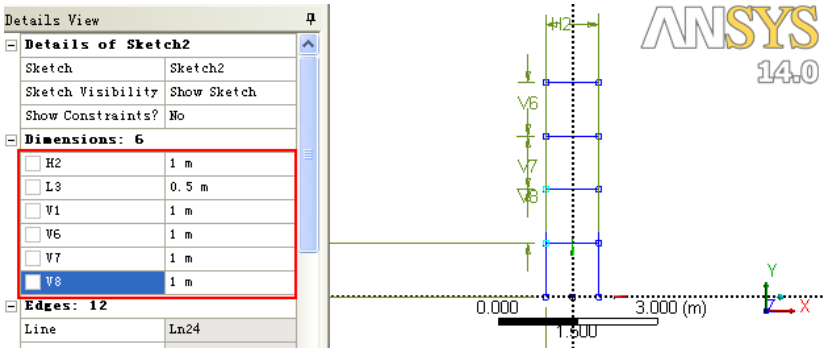


图 2-51　新平面草绘

Step17：单击 Modeling 按钮，选择绘制完成的 Sketch1 和 Sketch2，选择菜单栏 Concept→Line From Sketches 命令，如图 2-52 所示，并单击 Generate 按钮，此时生成的图形如图 2-53 所示。

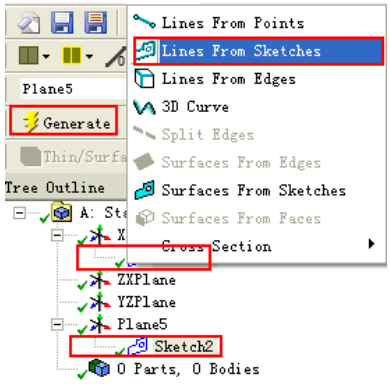


图 2-52　草绘转化

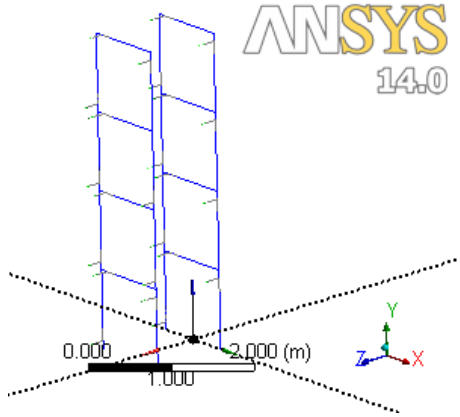


图 2-53　梁单元

Step18：选择菜单栏 Concept→3D Curve 命令，选择如图 2-54 所示的两个顶点，此时顶点加亮，并在中间生成一条加亮的线段，单击 Generate 按钮，生成线段。

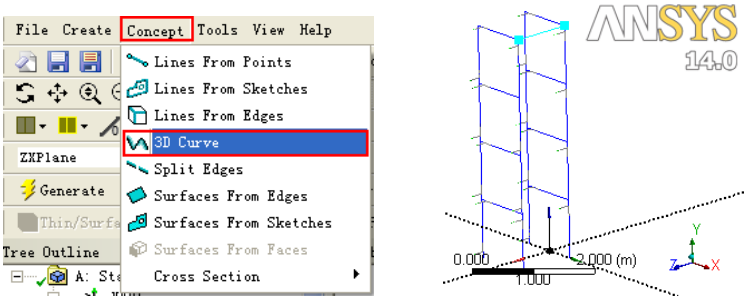


图 2-54　三维线段命令

Step19：重复以上操作，完成模型梁单元的建立，如图 2-55 所示。

Step20：单击工具栏上的 Point 按钮，如图 2-56 所示，在 Details View 面板中的 Details of Point2 中做如下更改。

在 Definition 中选择 Manual Input 选项，在出现的 Point Group 1（RMB）中一次输入 2.5m，4m，0.5m。

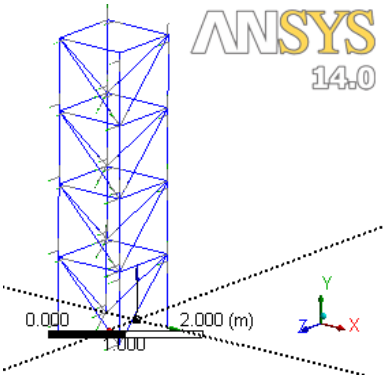


图 2-55　梁单元模型

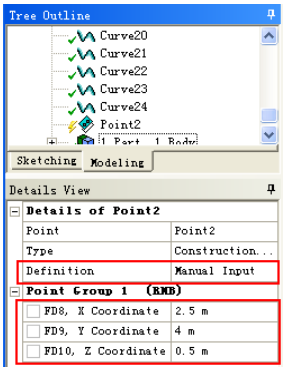


图 2-56　定义点坐标

Step21：单击工具栏上的 Generate 按钮，如图 2-57 所示，创建了一个点。

Step22：选择菜单栏 Concept→3D Curve 命令，然后做如图 2-58 所示的连接，并单击工具栏上的 Generate 按钮，创建悬臂梁单元。

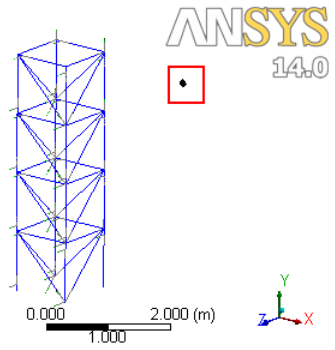


图 2-57　创建点模型

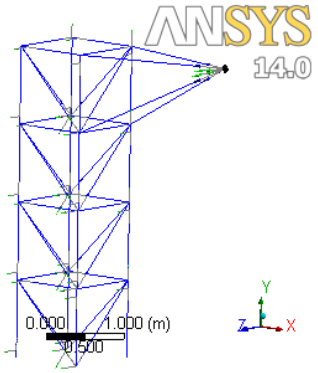


图 2-58　创建梁单元

Step23：如图 2-59 所示，选择菜单栏 Concept→Cross Section→Rectangular 命令。

Step24：在如图 2-60 所示的 Details View 面板中的 Dimensions:2 中 B 设置为 0.1m，H 设置为 0.1m，其余保持不变，并单击工具栏上的 Generate 按钮，创建悬臂梁单元截面形状。

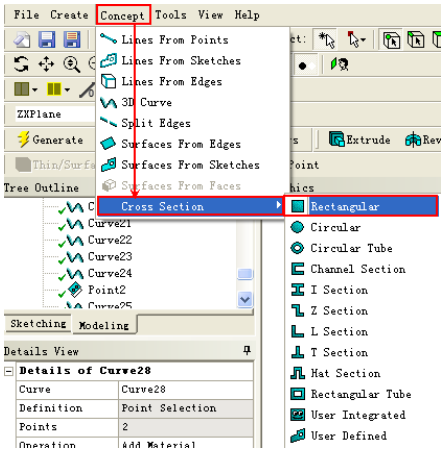


图 2-59　创建截面形状

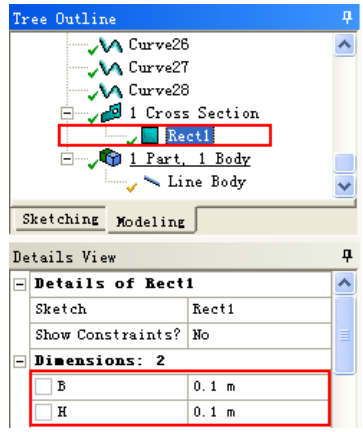


图 2-60　设置截面大小

Step25：在如图 2-61 所示的 Tree Outline 下面选择 Line Body 命令，在 Details View 面板中的 Cross Sectioin 中选择 Rect1 选项，其余保持不变，并单击工具栏上的 Generate 按钮。

Step26：如图 2-62 所示，选择菜单栏中的 View→Cross Section Solids 命令，使命令前出现 ✔ 标志，创建如图 2-63 所示的模型。

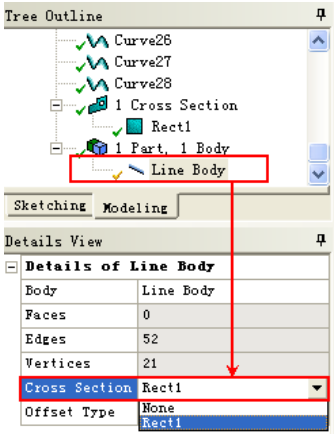


图 2-61　选择截面形状

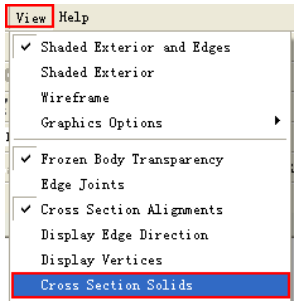


图 2-62　显示截面特性

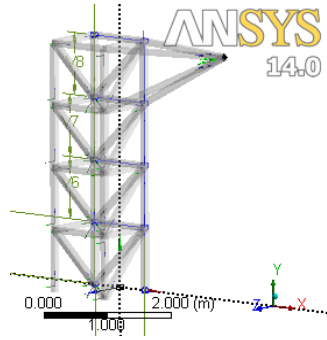


图 2-63　模型

4. 添加材料库

Step1：双击项目 A 中的 A2Engineering Data 选项，进入如图 2-64 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

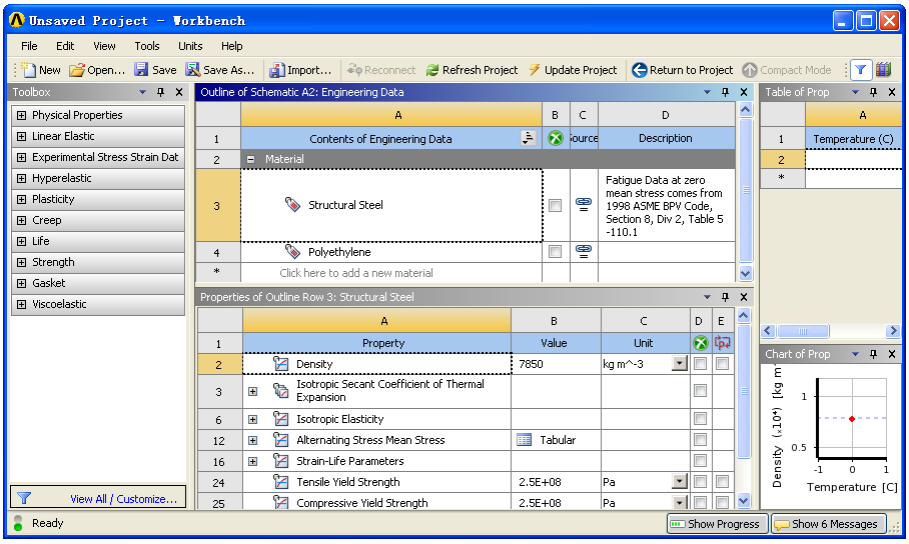


图 2-64　材料参数设置界面

Step2：在界面的空白处右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 2-65 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

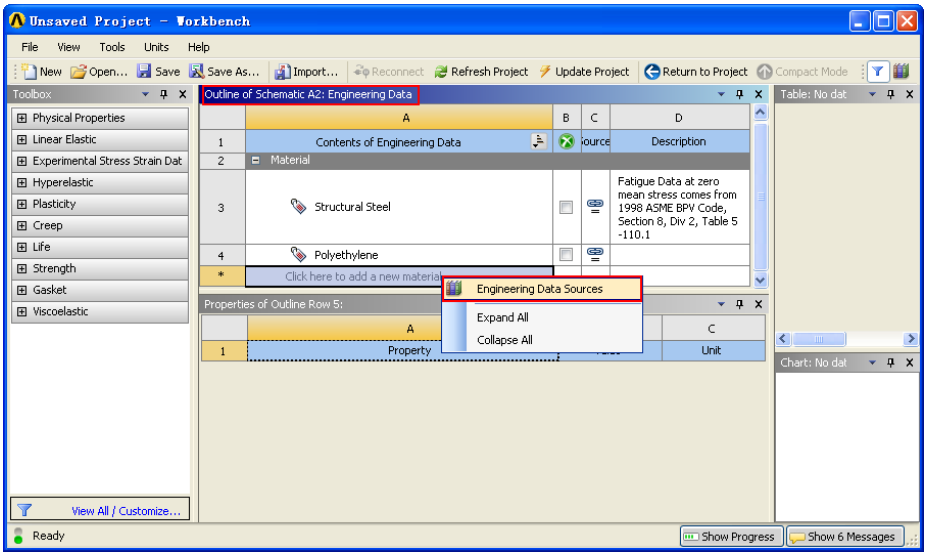


图 2-65　材料参数设置界面

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A3 栏 Structural Steel（结构钢）后的 B3 栏的（添加）按钮，此时在 C3 栏中会显示（使用中的）标识，如图 2-66 所示，标识材料添加成功。

Step4：同步骤 Step2，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 2-67 所示，本实例采用的是默认值。

提 示

用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

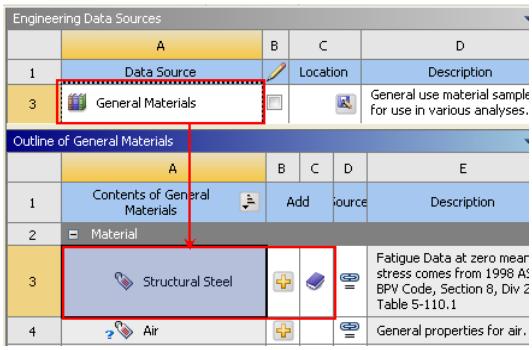


图 2-66　添加材料

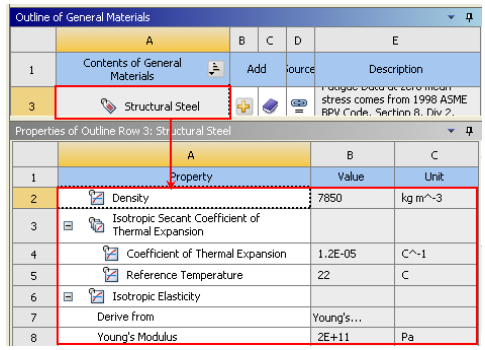


图 2-67　材料参数修改窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

5. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A3 栏 Model 选项，进入如图 2-68 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

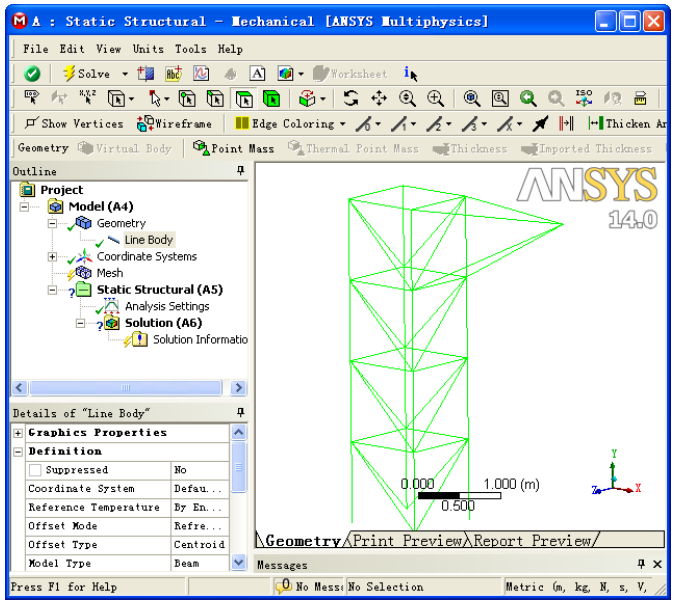


图 2-68　Mechanical 界面

提 示

此时分析树 Geometry 前显示的为问号?，表示数据不完全，需要输入完整的数据。本例是因为没有为模型添加材料的缘故。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中 Geometry 选项下的 Line Body，此时即可在 Details of “Line Body”（参数列表）中给模型添加材料，如图 2-69 所示。

Step3：选择参数列表中的 Material 下的 Assignment 选项，此时，会出现刚刚设置的材料 Stainless Steel，即材料已经被添加到模型中，如图 2-70 所示，表示材料已经添加成功。

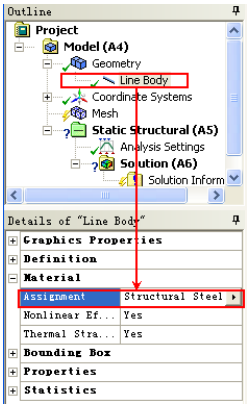


图 2-69　添加材料

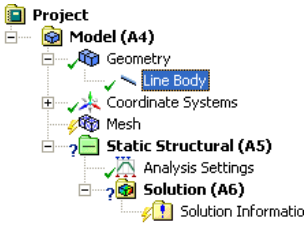


图 2-70　添加材料后的分析树

6. 划分网格

Step1：如图 2-71 所示，选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，本例在 Sizing 中的 Element Size 中设置为 0.1m，其余采用默认设置。

Step2：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 2-71 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 2-72 所示。

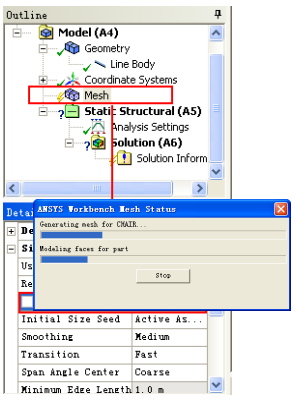


图 2-71　生成网格

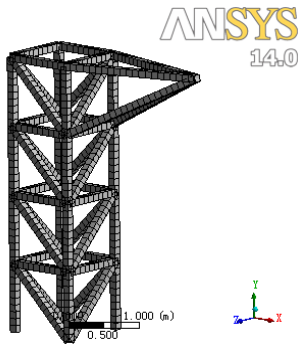


图 2-72　网格效果

7. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项，此时会出现如图 2-73 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 2-74 所示。

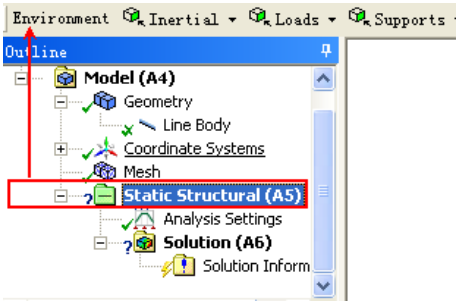


图 2-73　Environment 工具栏

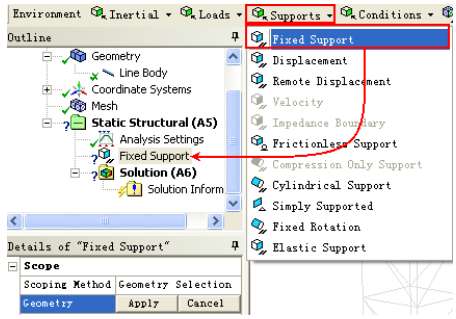


图 2-74　添加固定约束

Step3：选择 Fixed Support 选项，在工具栏中单击 按钮选择如图 2-75 所示的四个节点，单击 Details of "Fixed Support"（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束。

> **注 意**
>
> 单击菜单栏 View 中的 Cross Section Solids (Geometry) 按钮使其前面出现 ✔，即可显示实体。

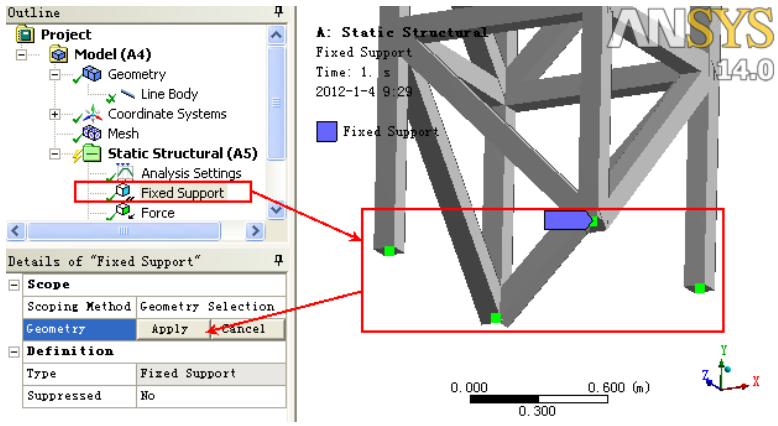


图 2-75　施加固定约束

Step4：如同 Step3 选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 2-76 所示。

Step5：如同 Step3 选择 Force 选项，选择需要施加力的点，确保 Details of "Force"（参数列表）中 Geometry 选项中显示 1 Vertex，同时在 Define By 选择 Component 选项，

然后在 X Component 中输入 20000N，在 Y Component 中输入−50000N，其余保持默认，如图 2-77 所示。

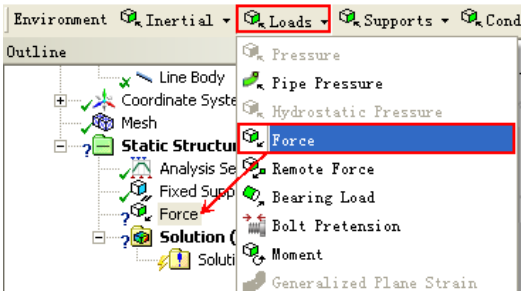


图 2-76　添加力载荷

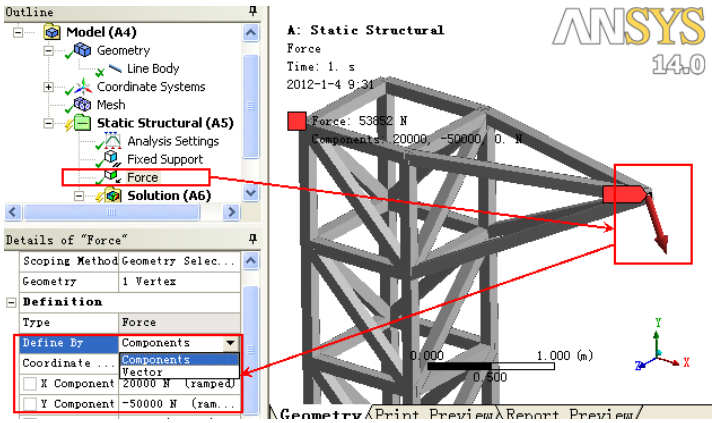


图 2-77　添加面载荷

Step6：在 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 2-78 所示。

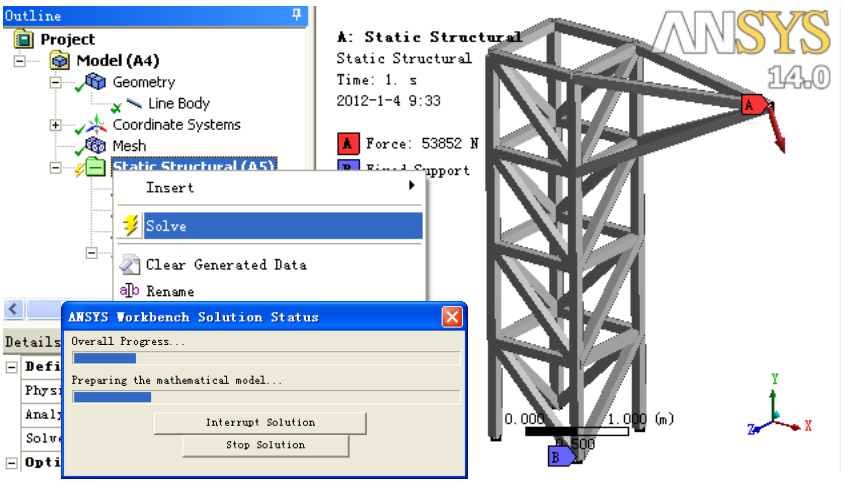


图 2-78　求解

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现如图 2-79 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 2-80 所示，此时，在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

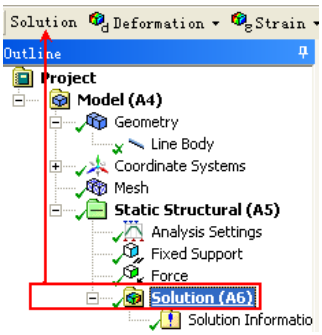


图 2-79　Solution 工具栏

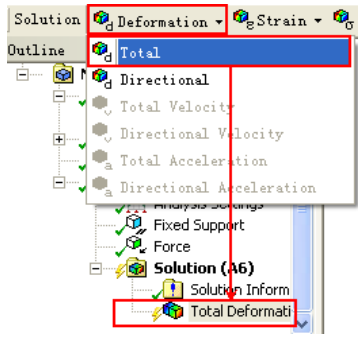


图 2-80　添加等效应力选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 2-81 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

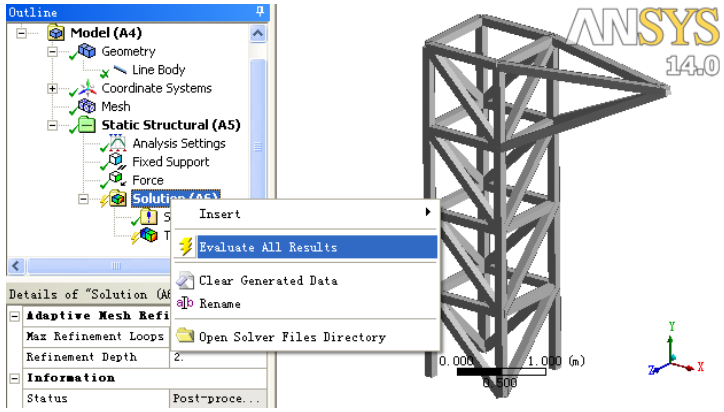


图 2-81　快捷菜单

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 2-82 所示的总变形分析云图。

Step5：选择 Solution 工具栏中的 Tools（工具）→Beam Tool 命令，如图 2-83 所示，此时在分析树中会出现 Beam Tool（梁单元工具）选项。

Step6：同 Step3，在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 2-84 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step7：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Beam Tool→ Direct Stress 命令，此时会出现如图 2-85 所示的应力分析云图。

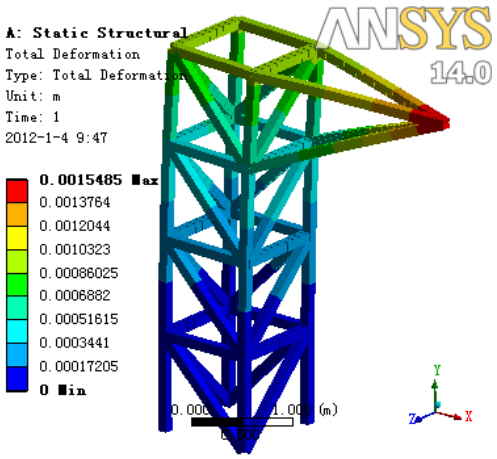


图 2-82　总变形云图

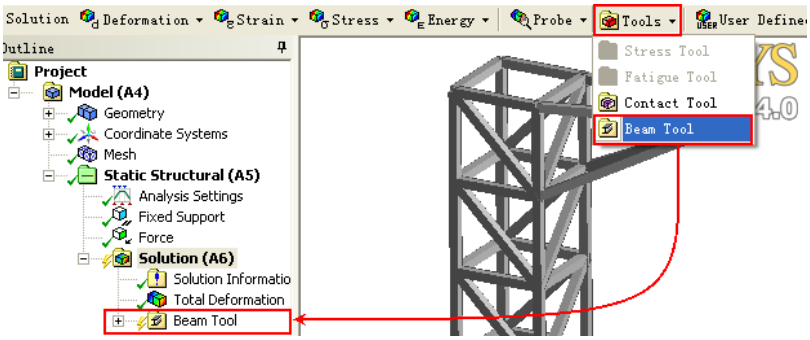


图 2-83　梁单元工具

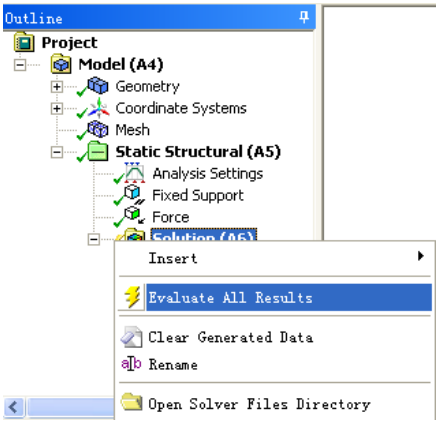


图 2-84　计算快捷菜单

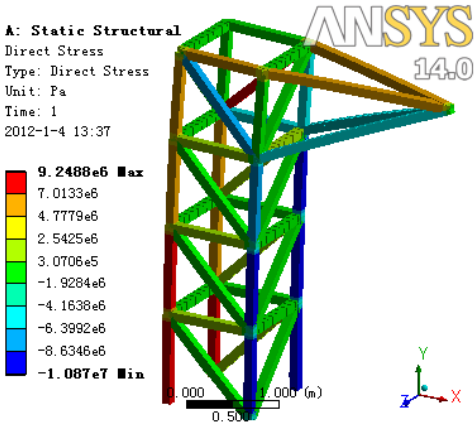


图 2-85　梁单元直接应力分布

9. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到

Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 2-86 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

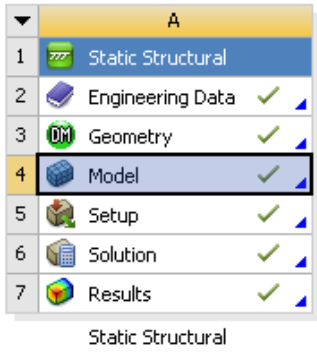


图 2-86　项目管理区中的分析项目

2.4　项目案例 3——曲面实体静力分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的结构线性静力分析模块，计算某增压器叶轮自转状态下的应力分布。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 静力学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ impeller_teleyhan.stp
结果文件	光盘\example\ impeller_teleyhan_StaticStructure.wbpj

1. 问题描述

如图 2-87 所示为某增压器叶轮模型，请用 ANSYS Workbench 分析增压器叶轮在 108rad/s 的转速下的应力分布。

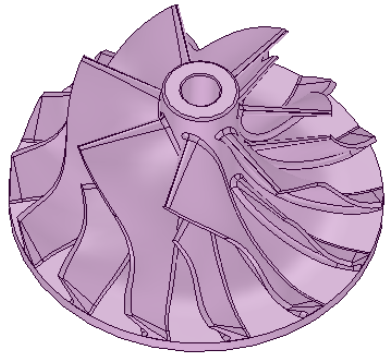


图 2-87　叶轮模型

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 2-88 所示。

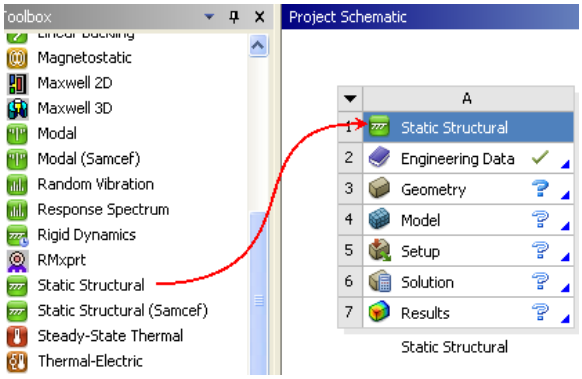


图 2-88　创建分析项目 A

3. 导入创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 2-89 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 impeller_teleyhan.stp 几何体文件，如图 2-90 所示，此时 A3Geometry 后的 变为，表示实体模型已经存在。

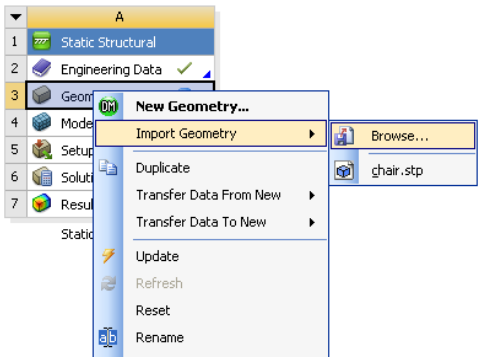


图 2-89　导入几何体

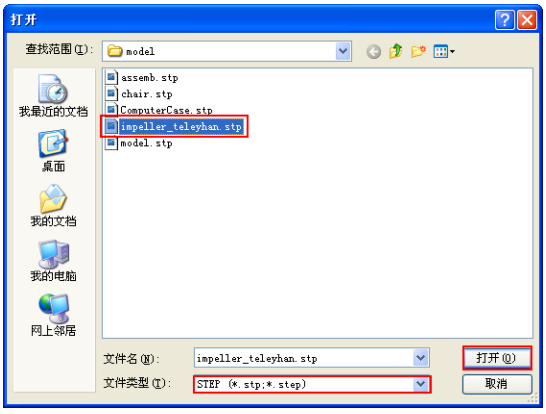


图 2-90　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A3 Geometry 栏，此时会进入到 DesignModeler 界面，此时设计树中 Import1 前显示，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 2-91 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 2-92 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

Step5：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

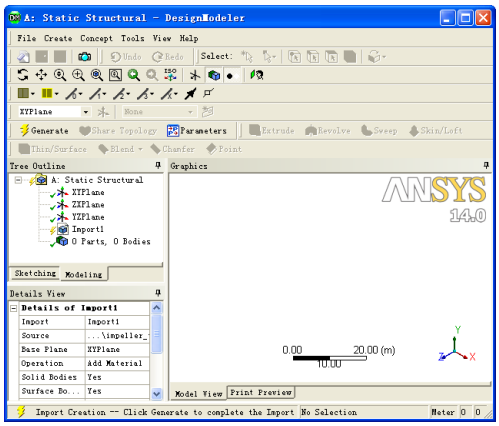


图 2-91　生成前的 DesignModeler 界面

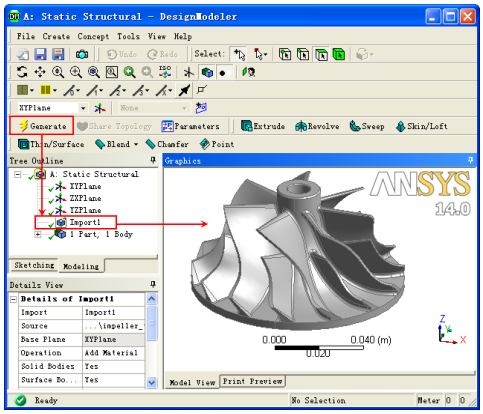


图 2-92　生成后的 DesignModeler 界面

4. 添加材料库

Step1：双击项目 A 中的 A2Engineering Data 选项，进入如图 2-93 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

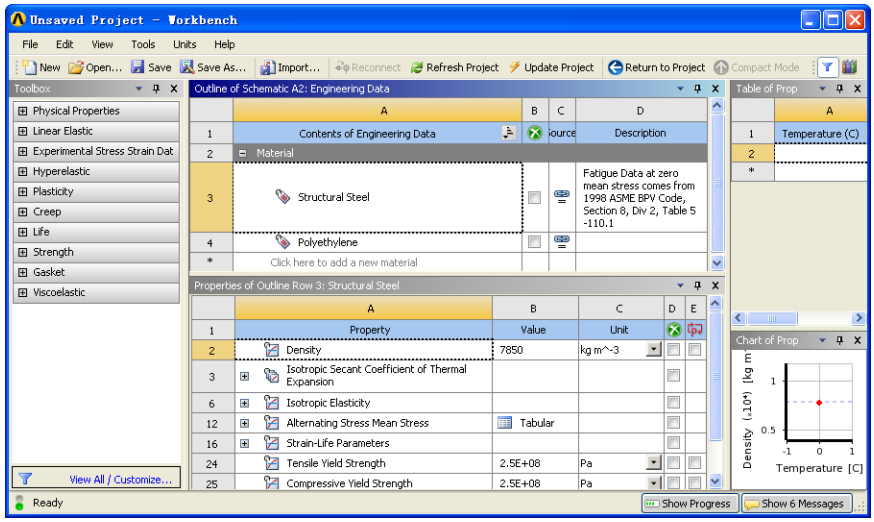


图 2-93　材料参数设置界面

Step2：在界面的空白处右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 2-94 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of Favorites 取代。

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A5 栏 Aluminium Alloy（铝合金）后的 B5 栏的（添加）按钮，此时在 C5 栏中会显示（使用中的）标识，如图 2-95 所示，标识材料添加

成功。

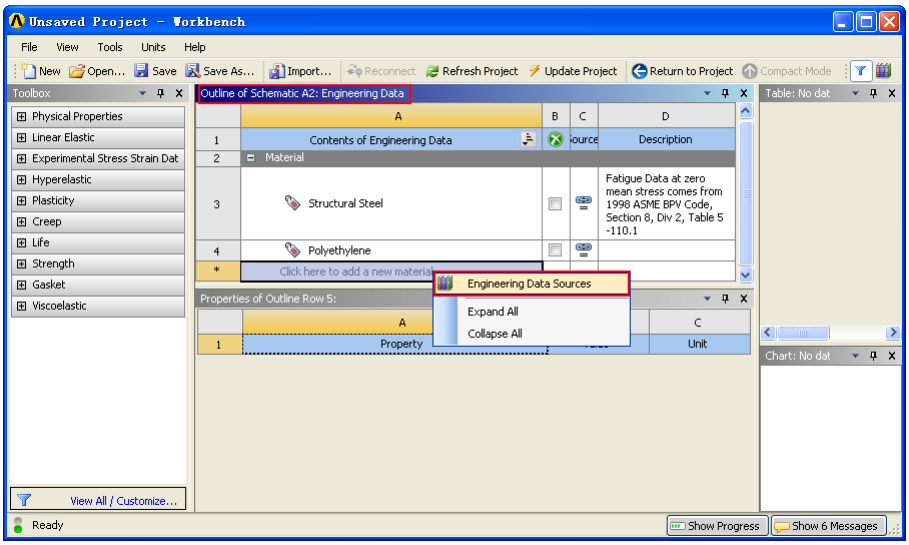


图 2-94　材料参数设置界面

Step4：同步骤 Step2，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 2-96 所示，本实例采用的是默认值。

提 示

用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

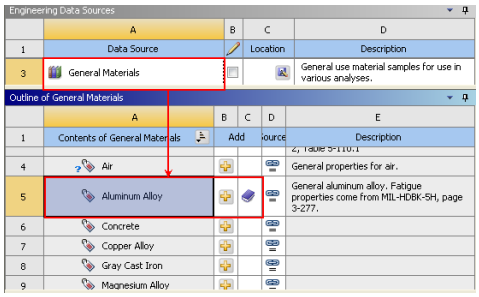


图 2-95　添加材料

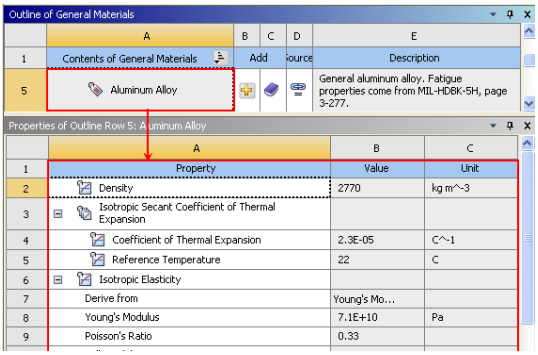


图 2-96　材料参数修改窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

5. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏 Model 选项，进入如图 2-97 所示

Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

提 示

此时分析树 Geometry 前显示的为问号?，表示数据不完全，需要输入完整的数据。本例是因为没有为模型添加材料的缘故。

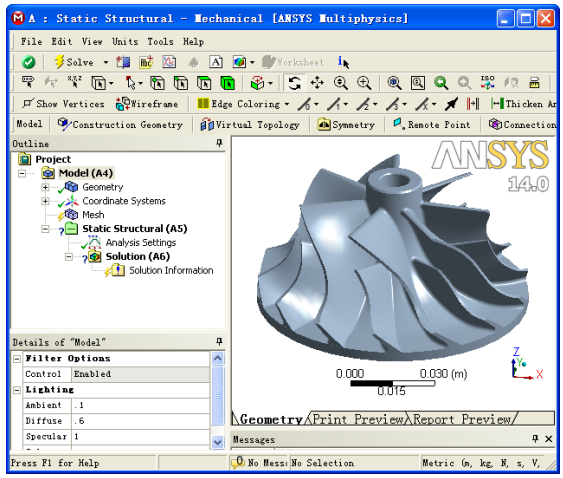


图 2-97　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中 Geometry 选项下的 TELEYHAN-293，此时即可在 Details of “TELEYHAN-293”（参数列表）中给模型添加材料，如图 2-98 所示。

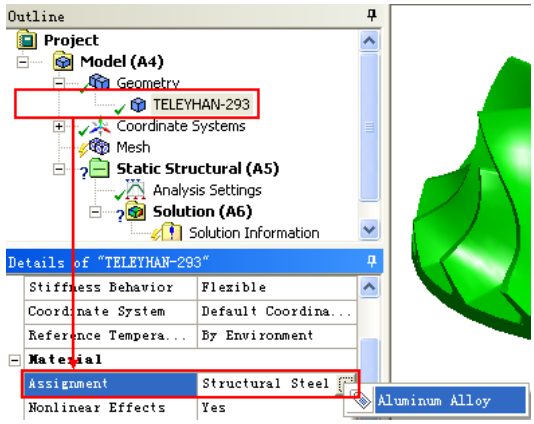


图 2-98　添加材料

6. 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 2-99 所示，在 Sizing→Relevance Center 中选择 Fine 选项，在 Element Size 中输入 1.e-003m，其余采用默认设置。

Step2：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate

Mesh 命令，此时会弹出如图 2-99 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 2-100 所示。

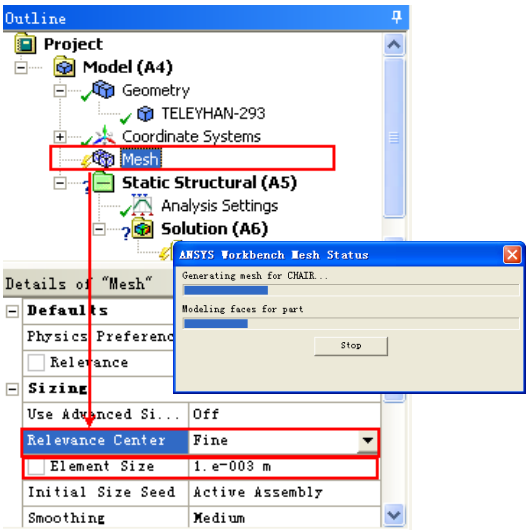


图 2-99　生成网格

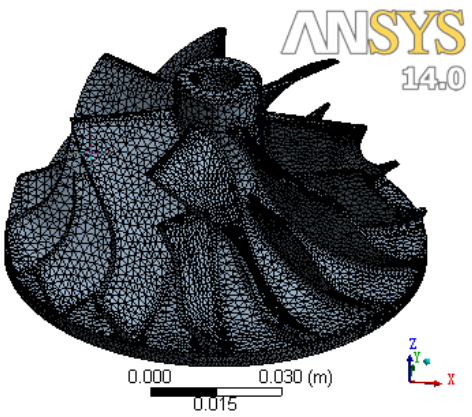


图 2-100　网格效果

7. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项，此时会出现如图 2-101 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Displacement（位移约束）命令，此时在分析树中会出现 Displacement 选项，如图 1-102 所示。

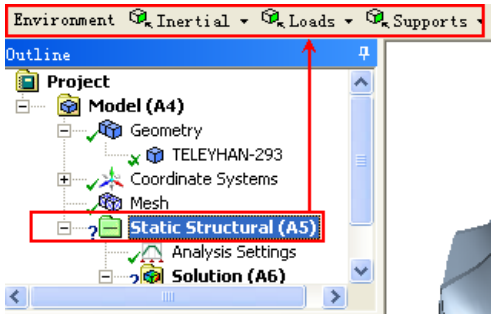


图 2-101　Environment 工具栏

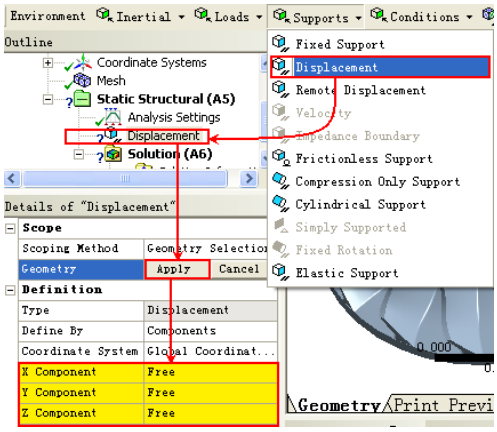


图 2-102　添加固定约束

Step3：选择 Displacement 选项，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Displacement”（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加位移约束，如图 2-103 所示，同时在 X Component、Y Component、Z Component 三栏中分别输入 0，其余采用默认。

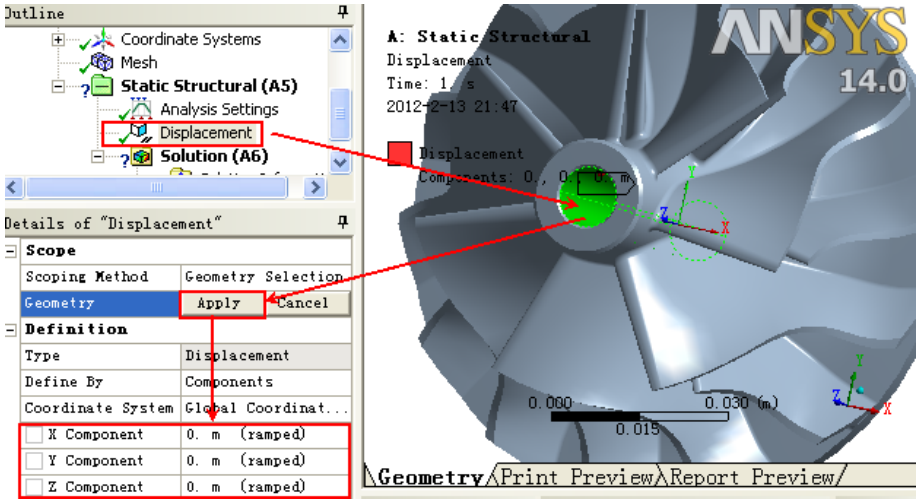


图 2-103　施加位移约束

Step4：如同 Step2，选择 Environment 工具栏中的 Inertial（惯性）→Rotational Velocity（转动速度）命令，此时在分析树中会出现 Rotational Velocity 选项，如图 2-104 所示。

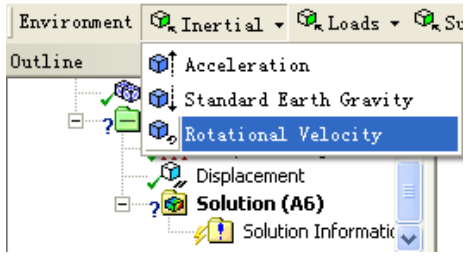


图 2-104　添加旋转速度载荷

Step5：如同 Step3，选择 Rotational Velocity 选项，此时整个实体模型已被选中，在 Details of "Rotational Velocity"（参数列表）的 Magnitude 栏中输入 108，同时在 Axis 栏中选择叶轮中心孔壁面，此时 Axis 后面的栏中会显示 Click to Change 字样，如图 2-105 所示，确定旋转轴后，在绘图区域出现一个旋转箭头。

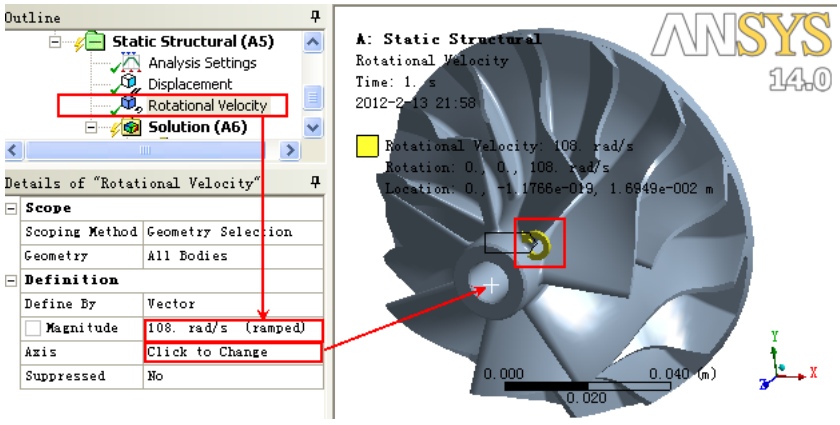


图 2-105　添加旋转速度

Step6：在 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 2-106 所示。

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现如图 2-107 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Stress（应力）→Equivalent（von-Mises）命令，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项，如图 2-108 所示。

Step3：如同 Step2，选择 Solution 工具栏中的 Strain（应变）→Equivalent（von-Mises）命令，如图 2-109 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent Elastic Strain（等效应变）选项。

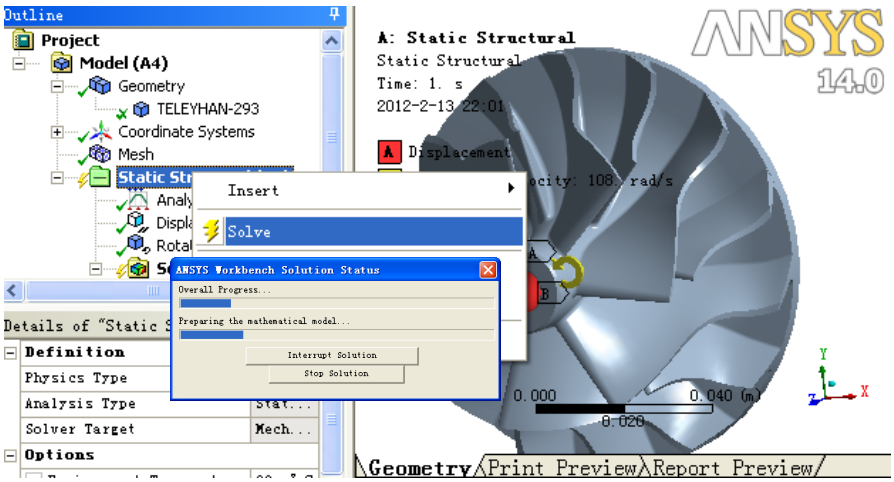


图 2-106　求解

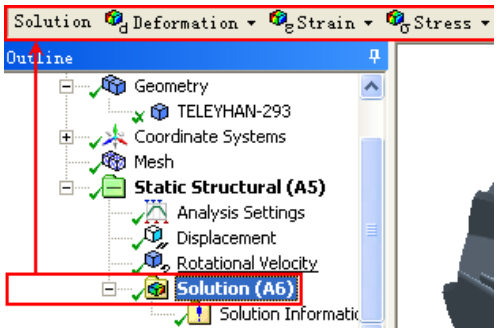


图 2-107　Solution 工具栏

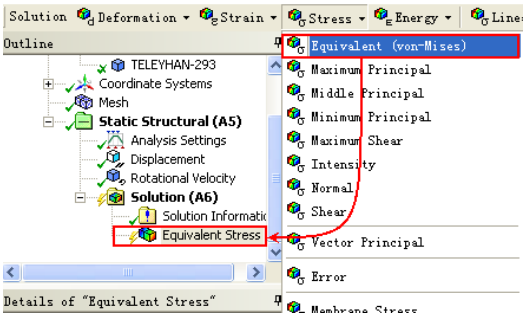


图 2-108　添加等效应力选项

Step4：如同 Step2，选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 2-110 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

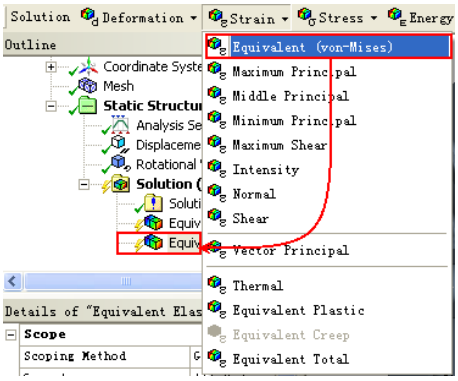


图 2-109　添加等效应变选项

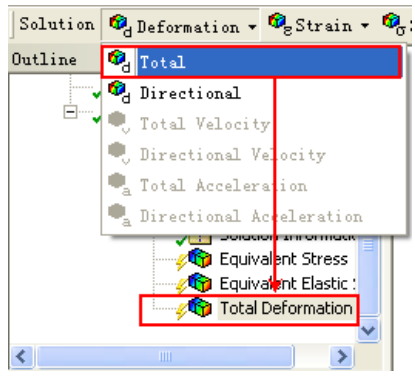


图 2-110　添加总变形选项

Step5：在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 2-111 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

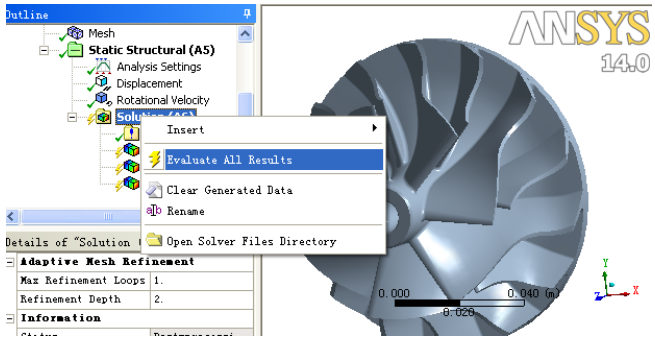


图 2-111　快捷菜单

Step6：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Equivalent Stress 选项，此时，会出现如图 2-112 所示的应力分析云图。

Step7：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Equivalent Elastic Strain 选项，此时，会出现如图 2-113 所示的应变分析云图。

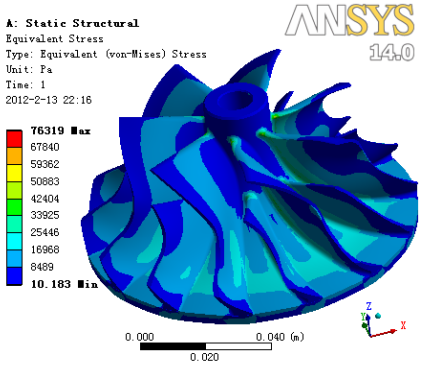


图 2-112　应力分析云图

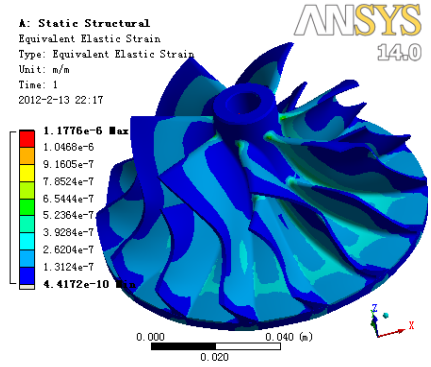


图 2-113　应变分析云图

Step8：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 2-114 所示的总变形分析云图。

9. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 2-115 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 impeller_teleyhan_StaticStructure。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

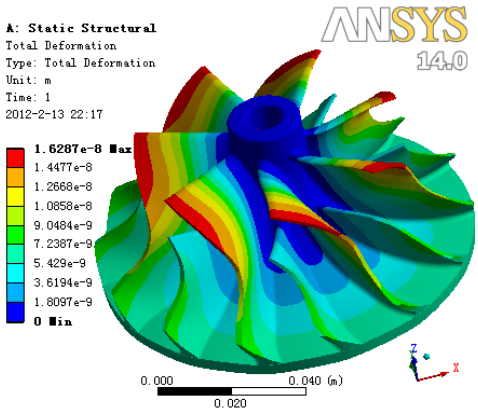


图 2-114　总变形分析云图

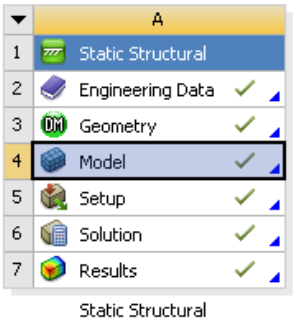


图 2-115　项目管理区中的分析项目

2.5 项目案例 4——支承座静态结构分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的结构线性静力分析模块，计算某支撑座在受力情况下的应力分布。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 静力学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\zhichengzuo.x_t
结果文件	光盘\example\ zhichengzuo.x_t.wbpj

1. 问题描述

轴类件是机械结构中常使用的部件之一，与之配套的轴支承座也常出现在各类机构中，如图 2-116 所示。假设支承座承受 1000N 的载荷，该支承座材料为铝合金。

1）添加材料和导入模型

Step1：在主界面中建立分析项目，项目为静态结构分析（Static Structural）。双击分

析系统（Analysis System）中的 Static Structural 选项，生成静态结构分析项目，如图 2-117 所示。

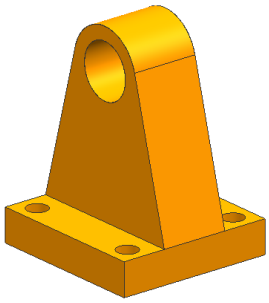


图 2-116　支承座

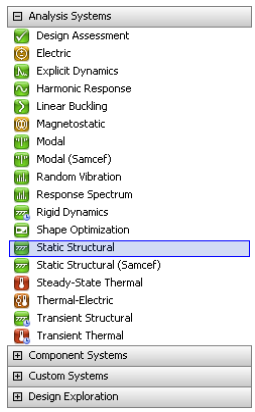




图 2-117　静态结构分析项目

Step2：双击 A 项目下部的 Static Structural 选项，将分析项目名更改为支承座，如图 2-118 所示。

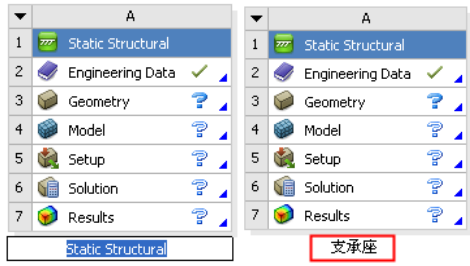


图 2-118　更改分析项目名称

Step3：双击 A2 栏 Engineering Data 选项进入如图 2-119 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

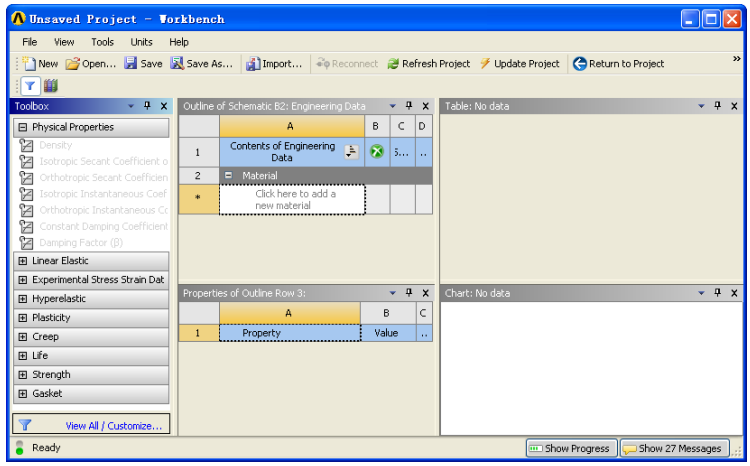


图 2-119　材料参数设置界面（一）

Step4：在界面的空白处单击鼠标右键，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 2-120 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

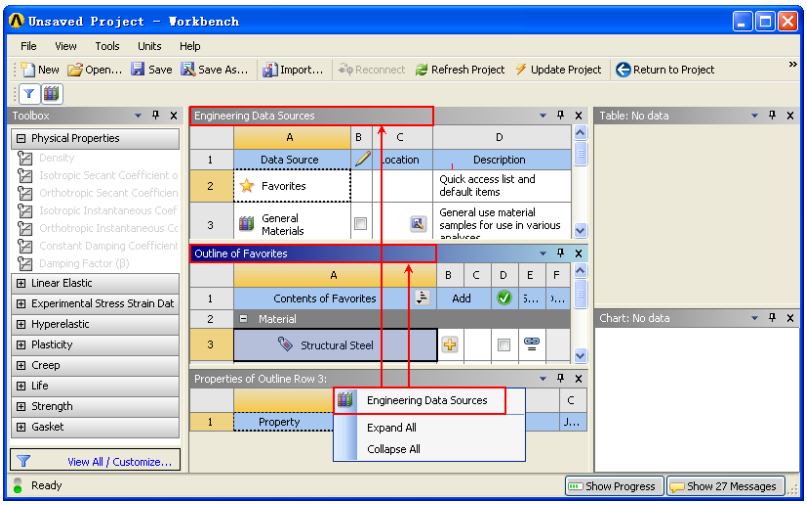


图 2-120　材料参数设置界面（二）

Step5：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A5 栏 Aluminum Alloy（铝合金）后的 B5 栏的（添加）按钮，此时在 C5 栏中会显示（使用中的）标识，如图 2-121 所示，标识材料添加成功。

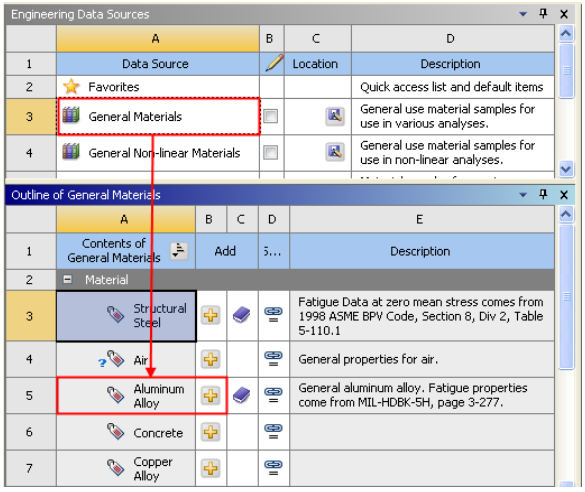


图 2-121　添加材料

Step6：同步骤 Step3，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step7：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Structal Steel 表中可以修改材料的特性，如图 2-122 所示，本实例采用的是默认值。

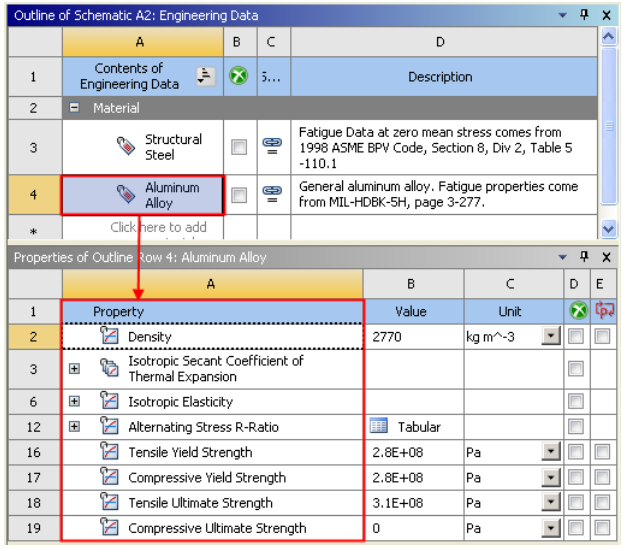


图 2-122　材料参数修改窗口

Step8：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

Step9：在 A3 栏的 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，在弹出的对话框中选择需要导入的模型 zhichengzuo.x_t，如图 2-123 所示。

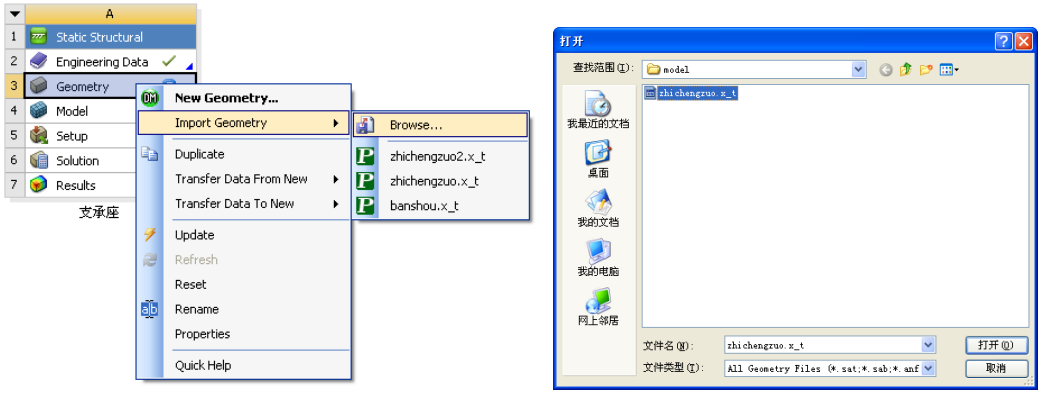


图 2-123　导入模型

2）修改模型

观察该支承座模型，它的上下两个部分是由两个简单模型组成的，如果将该模型切开可以方便地使用 sweep（扫略）方式划分较高质量的网格。

Step1：双击 A3 栏的 Geometry 选项打开 DM，在 DM 中单击 Generate 按钮，生成模型，如图 2-124 所示。

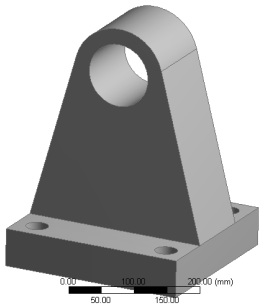


图 2-124　支承座模型

Step2：选择需要加载的面，如图 2-125 所示。在背景中右击，选择 Look At 命令，如图 2-126 所示。

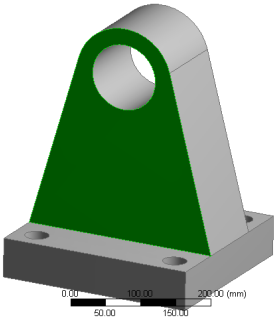


图 2-125　选择面

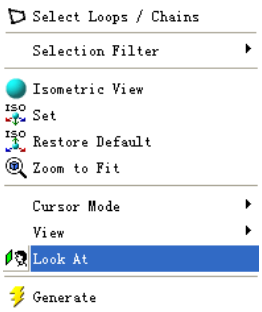


图 2-126　调整绘图视角

Step3：选择菜单栏中 tool→Freeze 命令，如图 2-127 所示。

Step4：选择 Sketching→Line 命令，如图 2-128 所示。

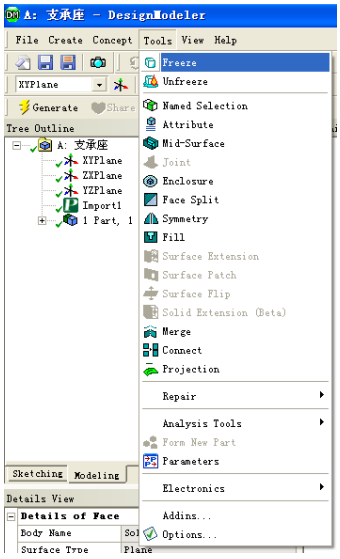


图 2-127　选择 Freeze

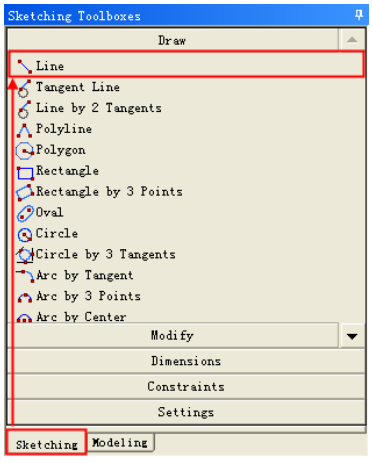


图 2-128　草图绘制选项

Step5：选择需要切割的两个点，如图 2-129 所示。

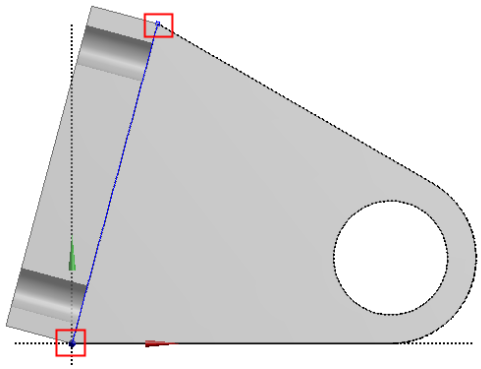


图 2-129　绘制切割线

Step6：单击特征工具栏中的 Extrude 按钮，如图 2-130 所示。



图 2-130　选择拉伸命令

Step7：在 Betails View 栏，Operation 项中选择 Slice Material 选项，如图 2-131 所示。

Step8：Extent Type 项选择 Through All 选项，如图 2-132 所示。

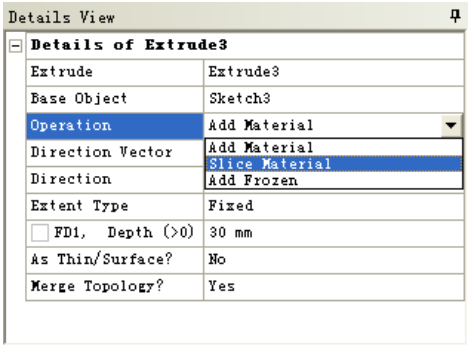


图 2-131　选择操作方式

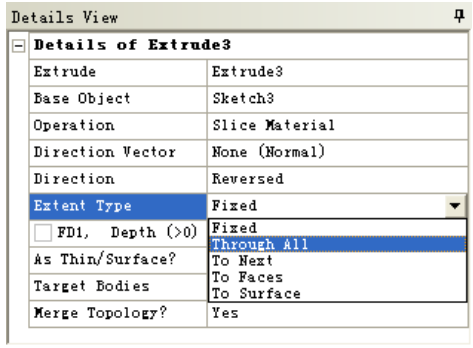


图 2-132　选择拉伸距离

Step9：单击 Generate 按钮完成切割操作，此时体已经被切割完成。读者可尝试使用（体选择命令）来选择不同的体。

Step10：单击按钮关闭 DM。

2. 赋予材料和划分网格

Step1：双击分析项目中 A4 栏 Model 选项，打开 Mechanical 界面。

Step2：单击 Outline 栏 Geometry 项前部的 按钮，按住 Ctrl 键选择两个 Solid 选项，如图 2-133 所示。

Step3：单击 Details of “Multiple Selection”栏中 Assignment 选后项后 按钮，如图 2-134 所示。选择 Aluminum Alloy 选项。

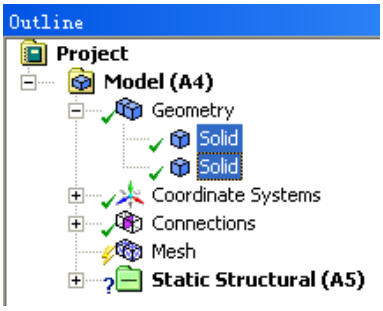


图 2-133　选择 Solid

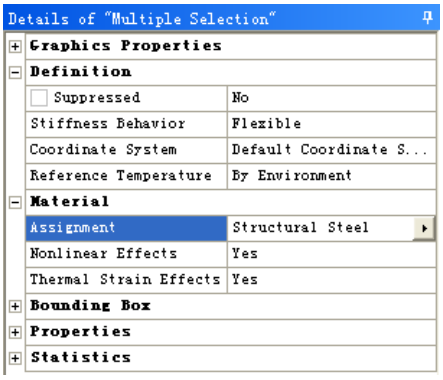


图 2-134　更改材料

Step4：选择 Outline 栏目中的 Mesh 选项，此时会出现网格参数设置列表，选择 Mesh Contral→Method 命令，如图 2-135 所示。

Step5：选择 Detals of　“Automatic Method”-Method 栏中 Gemetry 选项，选择两个体，单击 Apply 按钮，如图 2-136 所示。

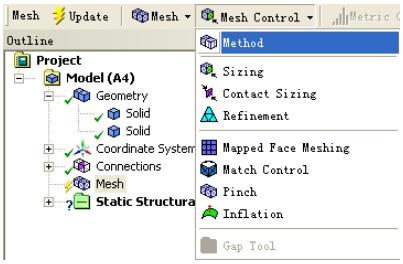


图 2-135　网格控制方法

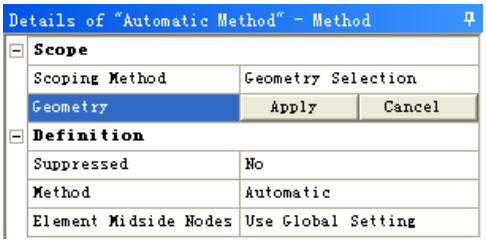


图 2-136　选择需要控制的体

Step6：单击 Detals of “Automatic Method”-Method 栏中 Method 项后的下拉箭头，选择 Sweep 选项，如图 2-137 所示。

Step7：在网格参数列表中选择 Details of “Mesh”栏中 Sizing 选项。在 Element Size 选项中 Default 输入.01，如图 2-138 所示。

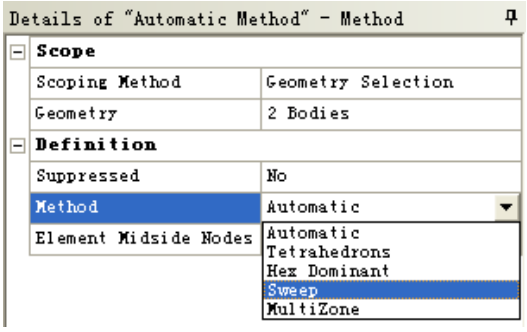


图 2-137　选择扫略方式

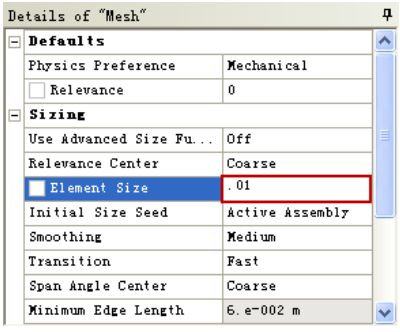


图 2-138　设置网格尺寸

Step8：在 Outline 栏中 Mesh 选项上右击，选择 Generate Mesh 命令，划分网格，如图 2-139 所示。划分后网格如图 2-140 所示。有兴趣的读者可以尝试不使用扫略方式划

分网格，划分后效果如图 2-141 所示，读者可以对比这两个网格的质量。

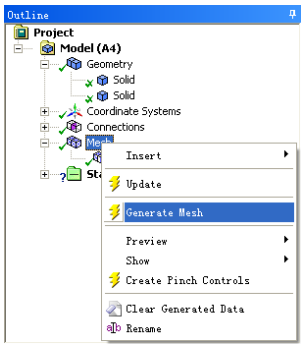


图 2-139　网格划分

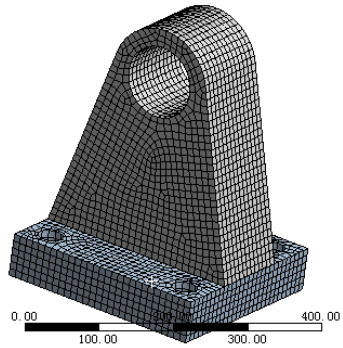


图 2-140　扫略法网格图

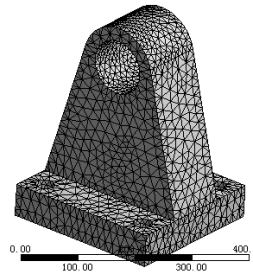


图 2-141　普通网格

3. 添加约束和载荷

Step1：选择 Outline 栏中 Static Structural（A5）选项，如图 2-142 所示，此时会出现如图 2-143 所示的 Environment（环境）工具栏。

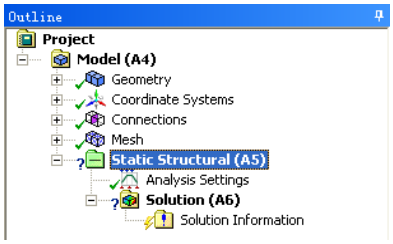


图 2-142　“边界条件”选项



图 2-143　环境工具栏

Step2：选择 Environment（环境）工具栏中的 Supports 菜单，在下拉菜单中选择 Displacement 命令，如图 2-144 所示。

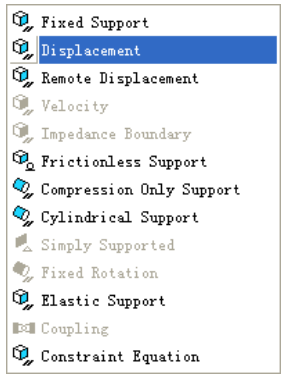


图 2-144　选择约束

Step3：选择支承座的底面，如图 2-145 所示。在 Details of “Displacement”栏中，单击 Geomtry 中的 Apply 按钮，如图 2-146 所示。

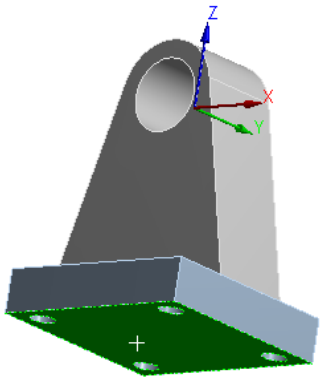


图 2-145　选择约束面

Details of "Displacement"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	Apply　Cancel
Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Free
Y Component	Free
Z Component	Free
Suppressed	No

图 2-146　位移约束参数设置

Step4：在 Z Component 项目中输入 0，如图 2-147 所示。

Step5：选择 Environment（环境）工具栏中 Supports 菜单，选择 Bearing Load（轴承载荷）命令，如图 2-148 所示。

Details of "Displacement"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	No Selection
Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	Free
Y Component	Free
Z Component	0
Suppressed	No

图 2-147　输入位移约束

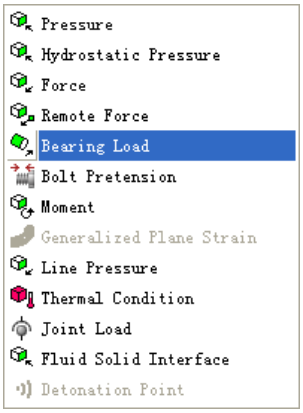


图 2-148　选择轴承载荷

Step6：选择圆柱面，如图 2-149 所示。在 Details of "Bearing Load"栏中，在 Define By 中选择 Components 选项，如图 2-150 所示。在 Georntry 中确定图 2-149 所示的圆柱面被选中，并在 Z Component 中输入−1000，如图 2-151 所示。

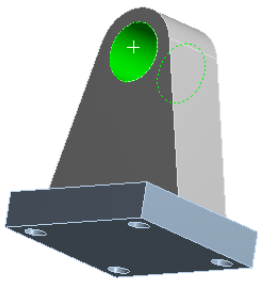


图 2-149　选择轴承载荷面

Details of "Bearing Load"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	No Selection
Definition	
Type	Bearing Load
Define By	Vector
Magnitude	Components / Vector
Direction	Click to Define
Suppressed	No

图 2-150　选择载荷方向

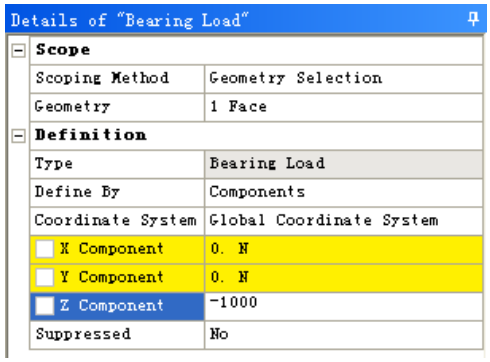


图 2-151　力载荷参数设置

4. 求解

在 Outline 栏中 Solution（A6）项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 2-152 所示。求解时会出现进度栏。当进度栏消失，同时 Solution（A6）项前方出现 ✔ 标识，说明求解已经结束，如图 2-153 所示。

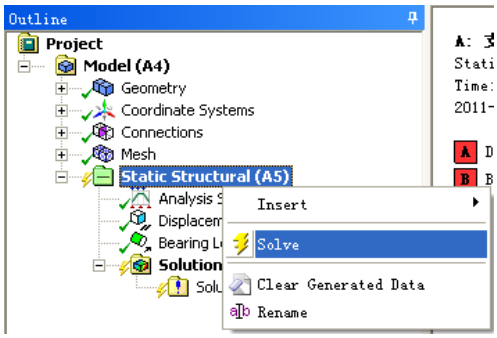


图 2-152　求解

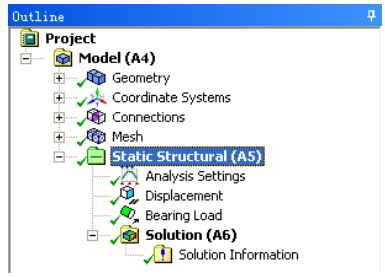


图 2-153　求解完成

5. 后处理

Step1：在 Outline 栏中的 Solution（A6）项上右击，在出现的快捷菜单中依次选择 Insert →Deformation →Total 命令，添加变形分析结果，如图 2-154 所示。

Step2：在 Outline 栏中 Solution（A6）项上右击，在出现的快捷菜单中依次选择 Insert →Stress →Equivalent 命令，添加应力分析结果。

Step3：在 Outline 栏中 Solution（A6）项上右击，选择 Evaluate All Results 命令显示结果，如图 2-155 所示。

Step4：在 Outline 栏中 Solution（A6）中 Total Deformation 项上单击，显示变形结果，如图 2-156 所示。读者可以发现虽然变形量只有 6.3777e-5Max，但显示的模型形变量很大。这里可以更改显示结果。在 Result 项中选择 1.0（True Scale）选项，如图 2-157 所示。这时可以发现变形图成为真实比例，如图 2-158 所示。

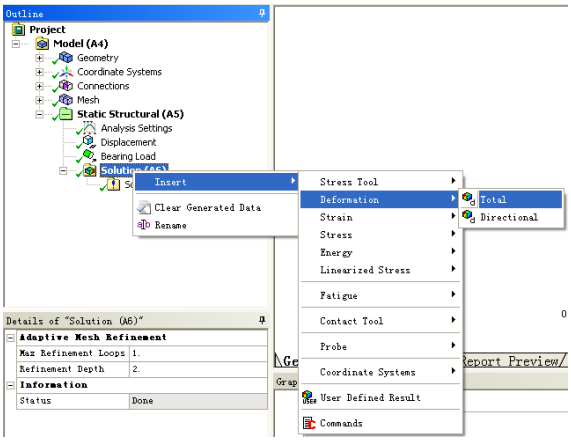


图 2-154　添加求解结果

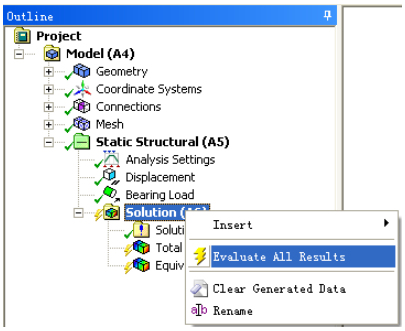


图 2-155　提取求解结果

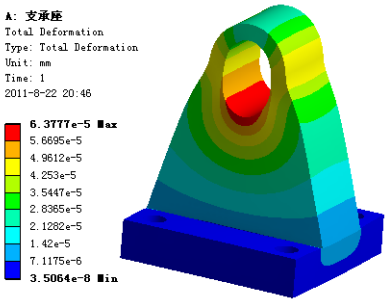


图 2-156　大比例变形结果

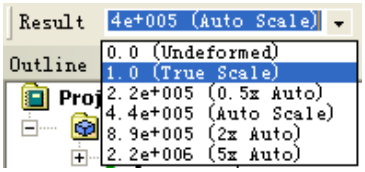


图 2-157　选择显示比例

Step5：在 Outline 栏中 Solution（A6）中 Equivalent Stress 项上单击，显示应力结果，如图 2-159 所示。

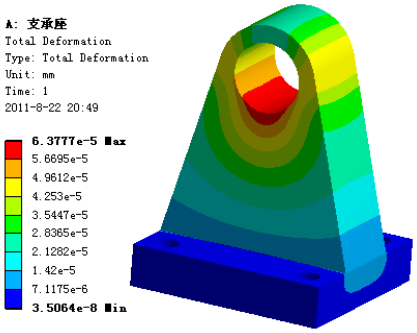


图 2-158　真实比例变形结果

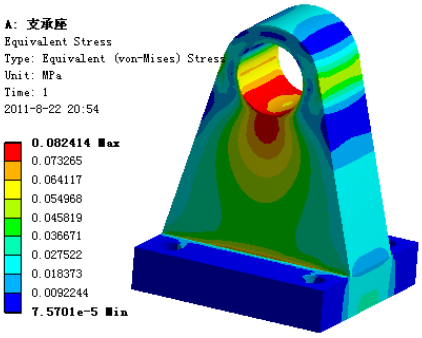


图 2-159　真实比例应力结果

6. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的按钮，退出 Mechanical 返回 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 2-160 所示。

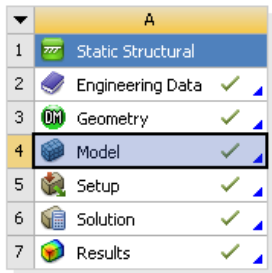


图 2-160　项目分析完成

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的Save按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击主界面右上角的按钮，退出 Workbench，完成项目分析。

2.6 本章小结

线性材料结构静力学分析是有限元分析中最常见的分析类型。在工业品、制造业、消费品、土木工程、医学研究、电力传输和电子设计等领域中经常用到此类分析。

本章节通过三个典型案例，分别介绍了梁单元、实体单元的有限元静力分析的一般过程，包括材料导入与建模、材料选择与材料属性赋予、有限元网格的划分、对模型施加边界条件与外载荷及结构后处理等。

通过本章节的学习，读者应对 ANSYS Workbench 结构静力学分析模块及操作步骤有详细的了解，同时熟悉掌握操作步骤与分析方法。

第 3 章

模态分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的模态分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对模态分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件模态分析的过程。

（2）了解模态分析与结构静力学分析的不同之处。

（3）掌握模态分析的应用场合。

3.1 模态分析简介

模态分析时最基本的线性动力学分析，用于分析结构的自振频率特性，包括固有频率和振型及振型参与系数。

1. 模态分析

模态分析的好处在于可以使结构设计避免共振或者以特定的频率进行振动；工程师从中可以认识到结构对不同类型的动力载荷是如何响应的；有助于在其他动力分析中估算求解控制参数。

ANSYS Workbench 14.0 模态求解器有如图 3-1 所示的几种类型，其中默认为程序自动控制类型（Program Control）。

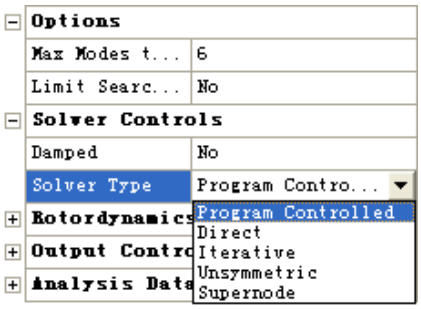


图 3-1　求解器控制

模态分析还是其他线性动力学分析的基础，如响应谱分析、谐响应分析、暂态分析

等均需在模态分析的基础上进行。

除了常规的模态分析外，ANSYS Workbench 14.0 还可计算含有接触的模态分析及考虑有预应力的模态分析。

如图 3-2 所示，为在工具箱中存在的两种进行模态计算的求解器，其中项目 A 为利用 Samcef 软件进行的模态分析，项目 B 为采用 ANSYS 默认求解器进行的模态分析。

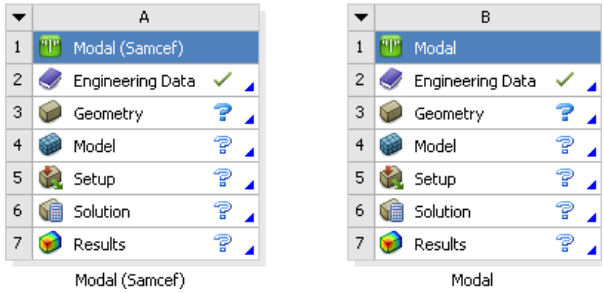


图 3-2　模态分析项目

2. 模态分析基础

经典力学理论可知，物体的动力学通用方程为

$$[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}''\}+[\boldsymbol{C}]\{\boldsymbol{x}'\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{F}(t)\} \tag{3-1}$$

式中，$[\boldsymbol{M}]$ 是质量矩阵；$[\boldsymbol{C}]$ 是阻尼矩阵；$[\boldsymbol{K}]$ 是刚度矩阵；$\{\boldsymbol{x}\}$ 是位移矢量；$\{\boldsymbol{F}(t)\}$ 是力矢量；$\{\boldsymbol{x}'\}$ 是速度矢量；$\{\boldsymbol{x}''\}$ 是加速度矢量。

无阻尼模态分析是经典的特征值问题，动力学问题的运动方程如下所示，即

$$[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}''\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{0}\} \tag{3-2}$$

结构的自由振动为简谐振动，即位移为正弦函数，即

$$\boldsymbol{x}=x\sin(\omega t) \tag{3-3}$$

带入上式得

$$([\boldsymbol{K}]-\omega^2[\boldsymbol{M}])\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{0}\} \tag{3-4}$$

式（3-4）为经典的特征值问题，此方程的特征值为 ω_i^2，其开方 ω_i 就是自振圆频率，自振频率为 $f=\dfrac{\omega_i}{2\pi}$。

特征值 ω_i 对应的特征向量 $\{x\}_i$ 为自振频率 $f=\dfrac{\omega_i}{2\pi}$ 对应的振型。

说　明

模态分析实际上就是进行特征值和特征向量的求解，也成为模态提取。模态分析中材料的弹性模量、泊松比及材料密度是必须定义的。

下面通过几个简单的实例介绍一下模态分析的方法和步骤。

3.2 项目案例 1——机箱模态分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的模态分析模块，计算计算机机箱自振频率特性。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 模态分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ ComputerCase.stp
结果文件	光盘\example\ Modal.wbpj

1. 问题描述

如图 3-3 所示为某计算机机箱模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算机机箱自振频率变形。

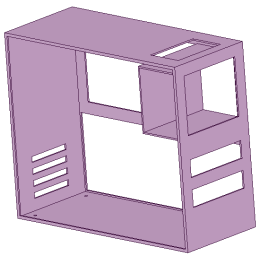


图 3-3 计算机机箱模型

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems →Modal（模态分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 3-4 所示。

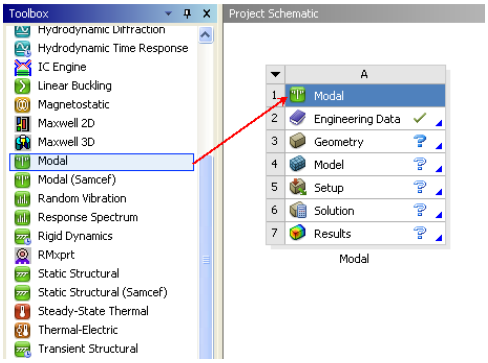


图 3-4 创建分析项目 A

3. 导入创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上右点，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 3-5 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 ComputerCase.stp 几何体文件，如图 3-6 所示，此时 A3Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

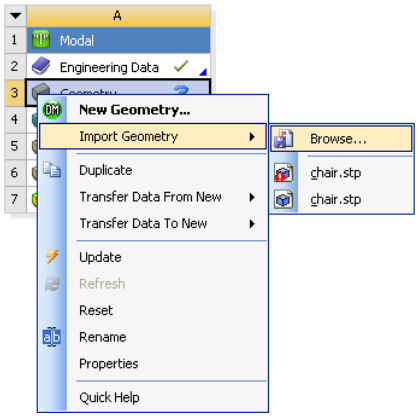


图 3-5　导入几何体

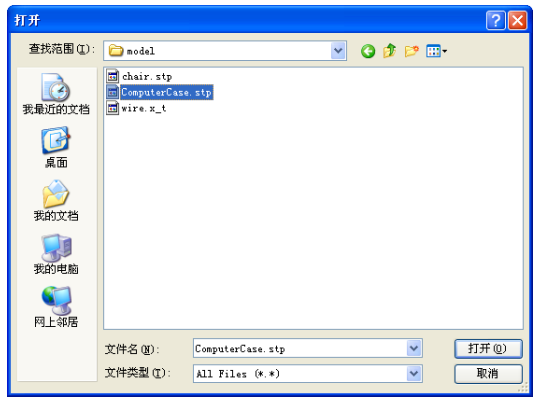


图 3-6　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A3 Geometry 按钮，此时会进入到 DesignModeler 界面，此时设计树中 Import1 前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 3-7 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 3-8 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

Step5：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

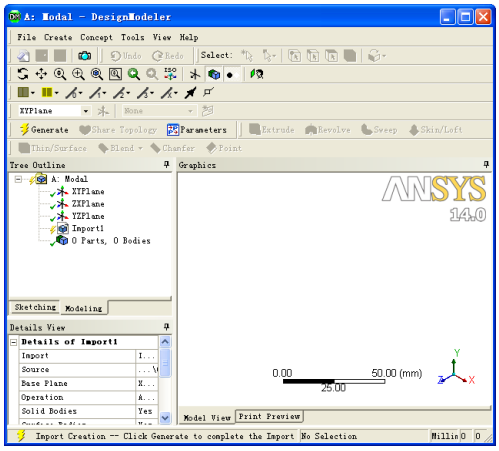


图 3-7　生成前的 DesignModeler 界面

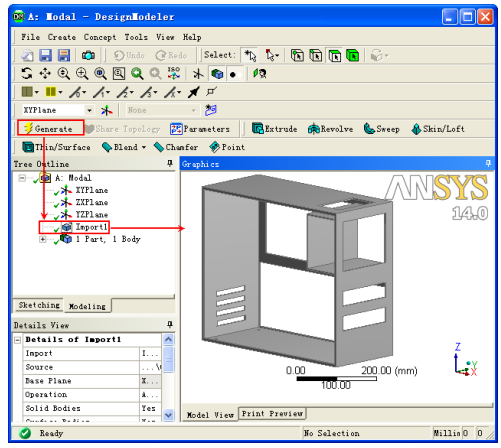


图 3-8　生成后的 DesignModeler 界面

4. 添加材料库

Step1：选择项目 A 中的 A2Engineering Data 选项，进入如图 3-9 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

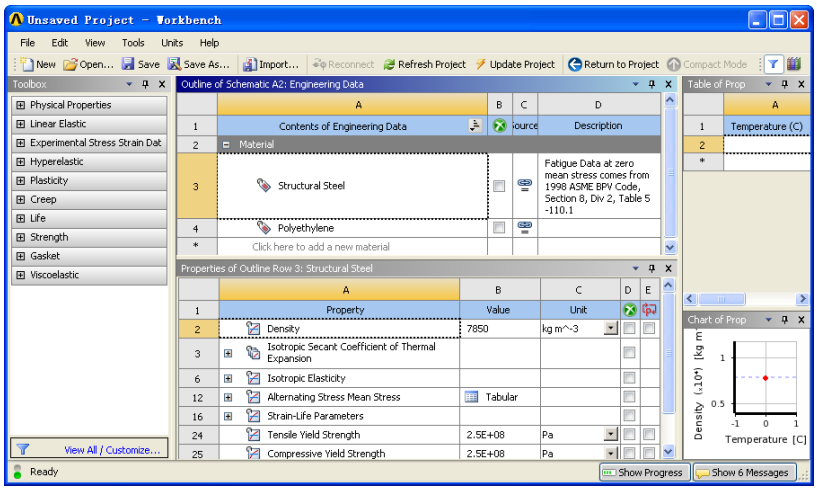


图 3-9　材料参数设置界面（一）

Step2：在界面的空白处右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 3-10 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

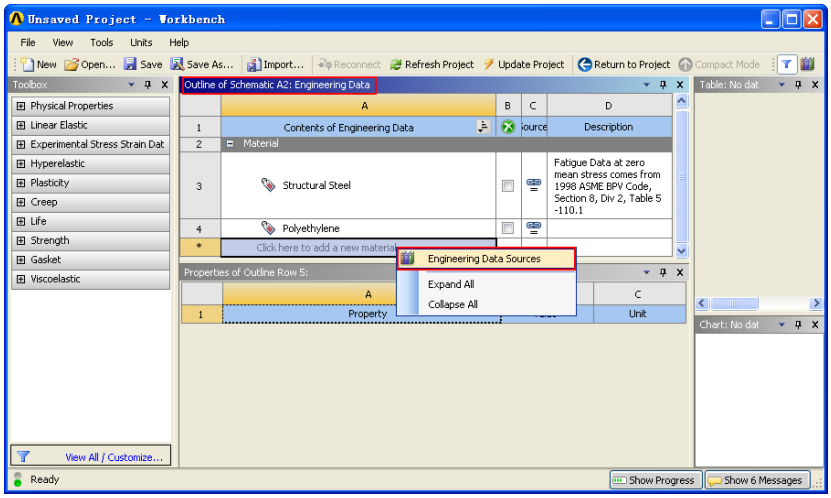


图 3-10　材料参数设置界面（二）

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A3 栏 Structural Steel（结构钢）后的 B3 栏的 （添加）按钮，此时在 C3 栏中会显示 （使用中的）标识，如图 3-11 所示，标识材料添加成功。

Step4：同步骤 Step2，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 3-12 所示，本实例采用的是默认值。

提 示

用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，这在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

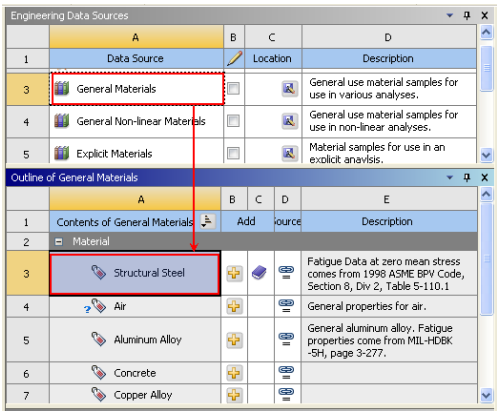


图 3-11　添加材料

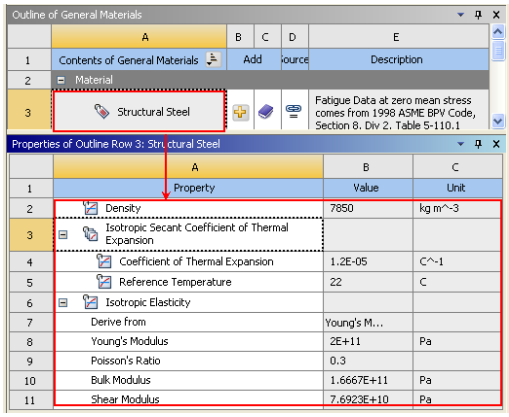


图 3-12　材料参数修改窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

5. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏 Model 选项，进入如图 3-13 所示的 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

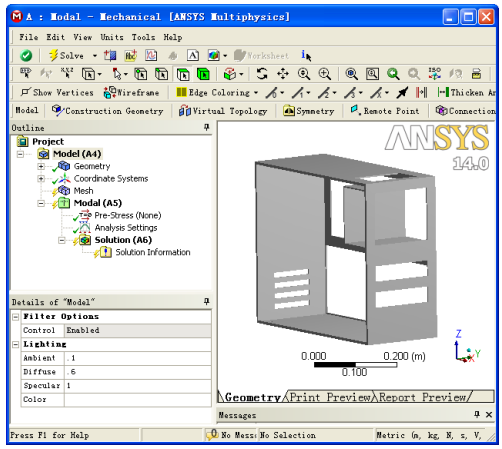


图 3-13　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中 Geometry 选项下的 ComputerCase，此时即可在 Details of "1"（参数列表）中给模型添加材料，如图 3-14 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 后的按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Stainless Steel，选择即可将其添加到模型中去。此时分析树 Geometry 前的?变为✓，如图 3-15 所示，表示材料已经添加成功。

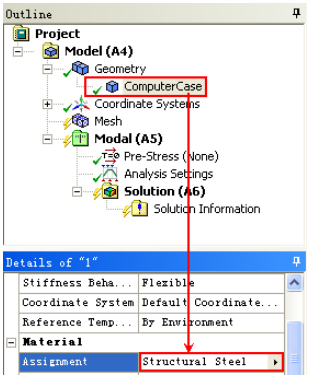


图 3-14　添加材料

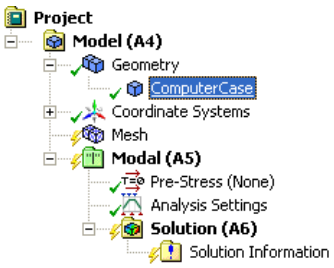


图 3-15　添加材料后的分析树

6. 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，如图 3-16 所示，在 Sizing 中的 Relevance Center 中设置为 Fine，其余采用默认设置。

Step2：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 3-16 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 3-17 所示。

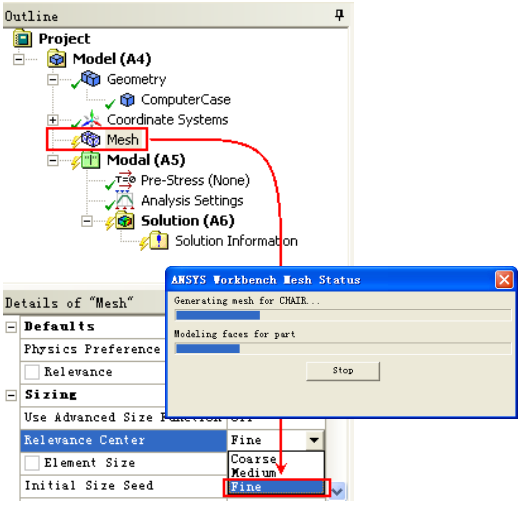


图 3-16　生成网格

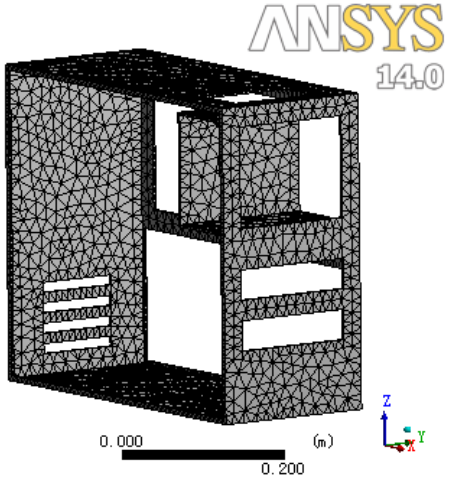


图 3-17　网格效果

7. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Modal（A5）选项，此时会出现如图 3-18 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 3-19 所示。

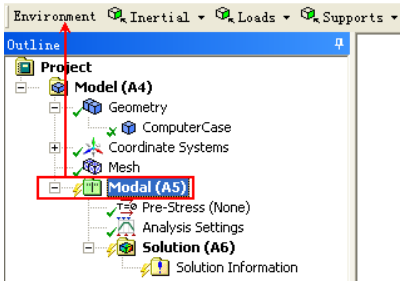


图 3-18　Environment 工具栏

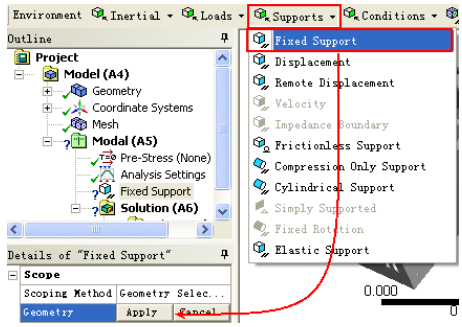


图 3-19　添加固定约束

Step3：选择 Fixed Support 选项，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of "Fixed Support"中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 3-20 所示。

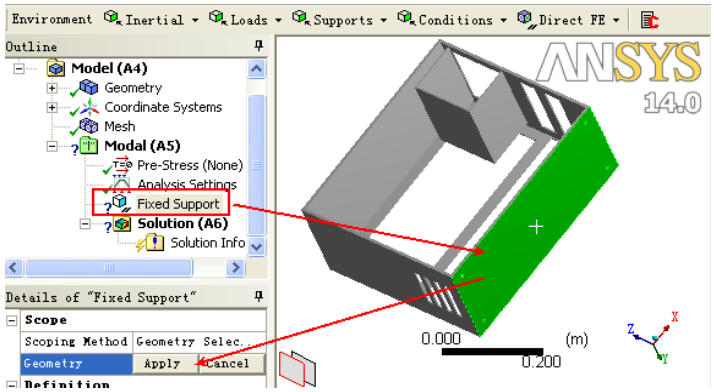


图 3-20　施加固定约束

Step4：在 Outline（分析树）中的 Modal（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 3-21 所示。

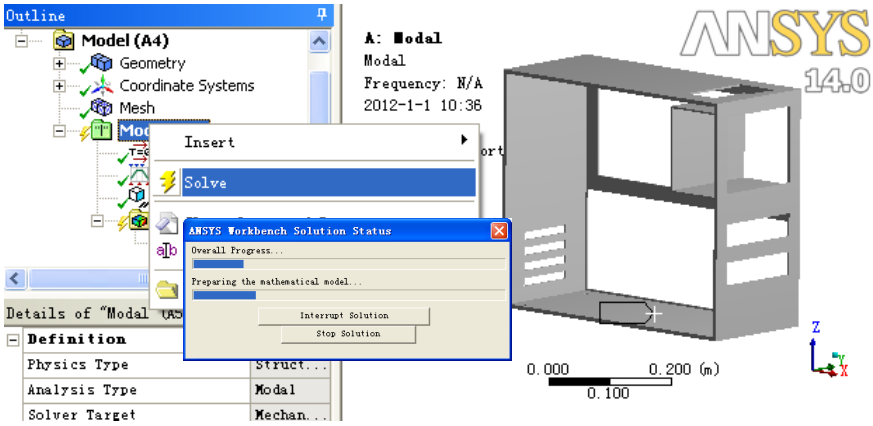


图 3-21　求解

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现如图 3-22 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 3-23 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

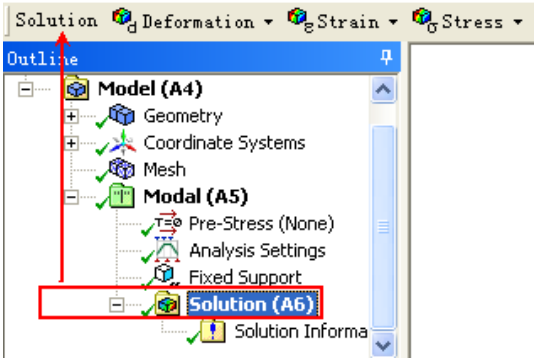


图 3-22　Solution 工具栏

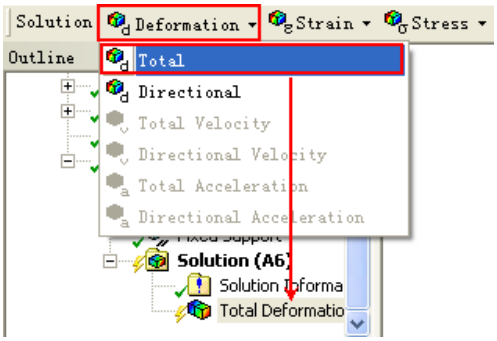


图 3-23　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 3-24 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 3-25 所示的一阶模态总变形分析云图。

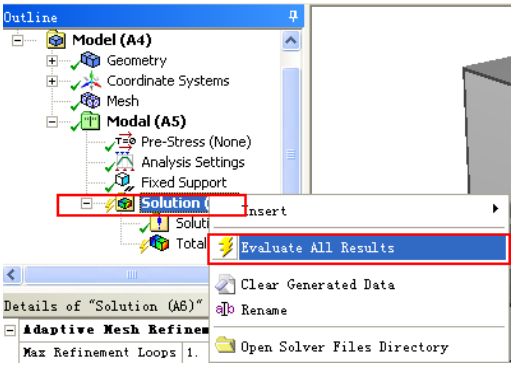


图 3-24　快捷菜单

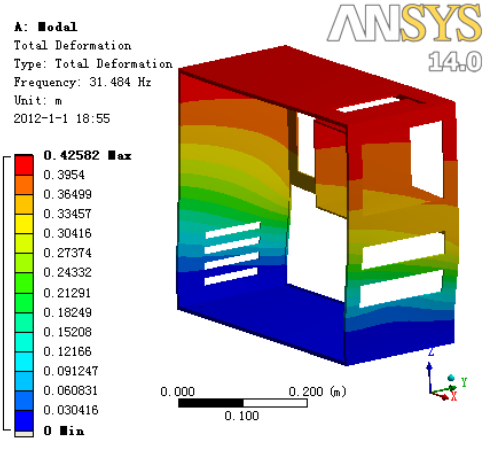


图 3-25　一阶变形

Step5：图 3-26 所示为计算机机箱二阶变形云图。

Step6：图 3-27 所示为计算机机箱三阶变形云图。

Step7：图 3-28 所示为计算机机箱四阶变形云图。

Step8：图 3-29 所示为计算机机箱五阶变形云图。

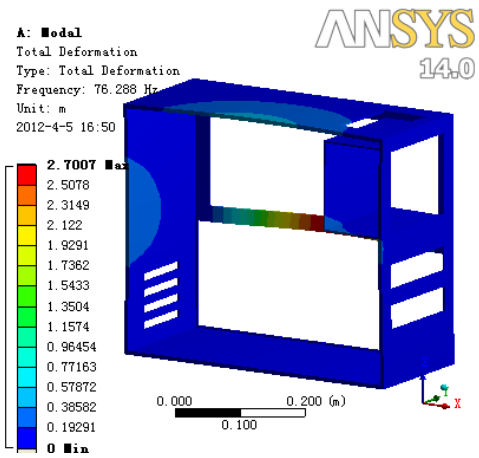


图 3-26　二阶变形

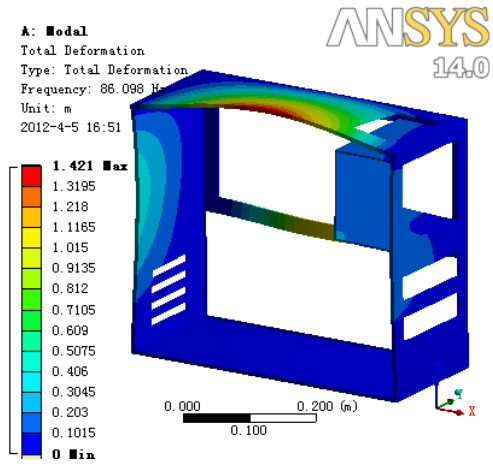


图 3-27　三阶变形

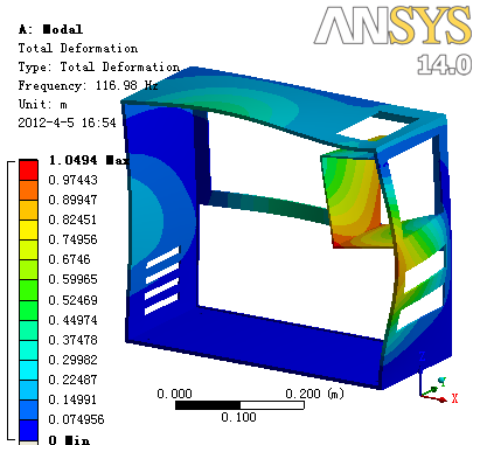


图 3-28　四阶变形

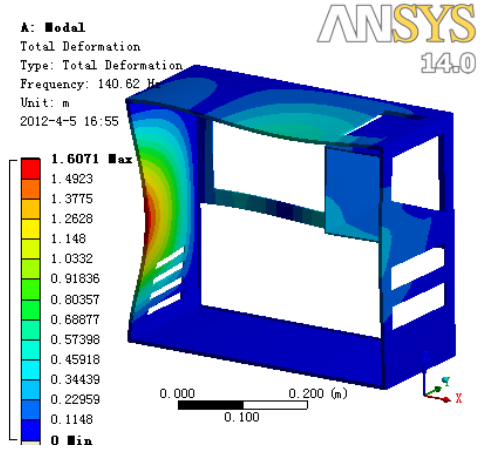


图 3-29　五阶变形

Step9：图 3-30 所示为计算机机箱六阶变形云图。

Step10：图 3-31 所示为计算机机箱前 6 阶模态频率，Workbench 模态计算时的默认模态数量为 6。

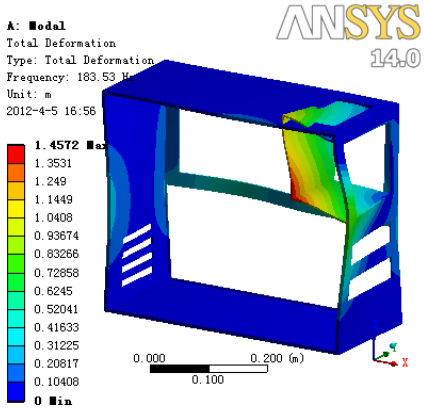


图 3-30　六阶变形

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	31.484
2	2.	76.288
3	3.	86.098
4	4.	116.98
5	5.	140.62
6	6.	183.53

图 3-31　各阶模态频率

Step11：选择 Outline（分析树）中 Modal（A5）下的 Analysis Settings（分析设置）选项，在下面如图 3-32 所示的 Details of “Analysis Settings”下面的 Options 中有 Max Modes to Find 选项，在此选项中可以修改模态数量。

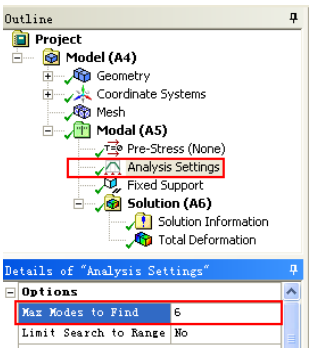


图 3-32　修改模态数量选项

9. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 3-33 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

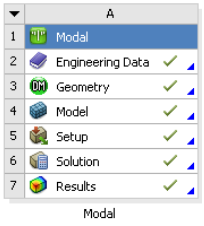


图 3-33　项目管理区中的分析项目

3.3 项目案例 2——有预应力模态分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的模态分析模块，计算零件在有预拉应力下的模态。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 有预应力模态分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ model.stp
结果文件	光盘\example\ PreStressModal.wbpj

1. 问题描述

如图 3-34 所示为某模型，请用 ANSYS Workbench 分析分别计算同一零件在有预拉应力工况下的固有频率。

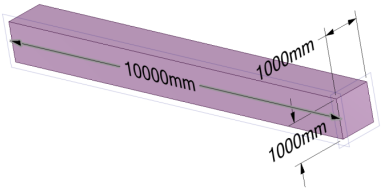


图 3-34　计算模型

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Custom Systems→Pre-Stress Modal（预应力模态分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）同时创建分析项目 A（静力分析）及项目 B（模态分析），如图 3-35 所示。

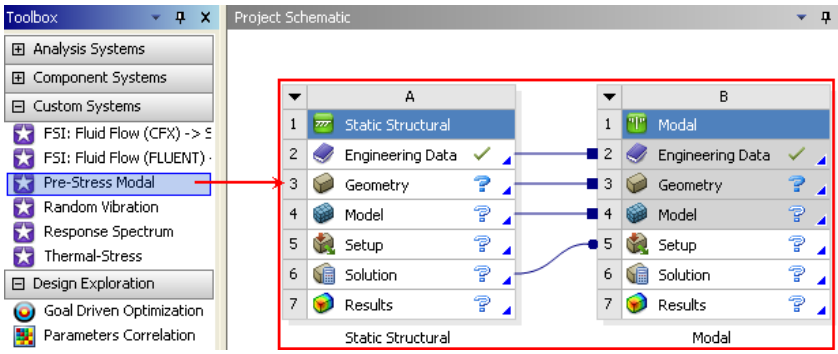


图 3-35　创建分析项目 A 及项目 B

3. 导入创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse 命令，如图 3-36 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 ComputerCase.stp 几何体文件，如图 3-37 所示，此时 A3Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

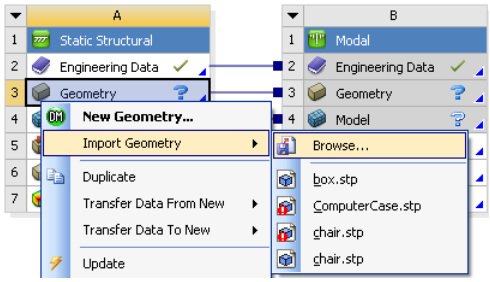


图 3-36　导入几何体

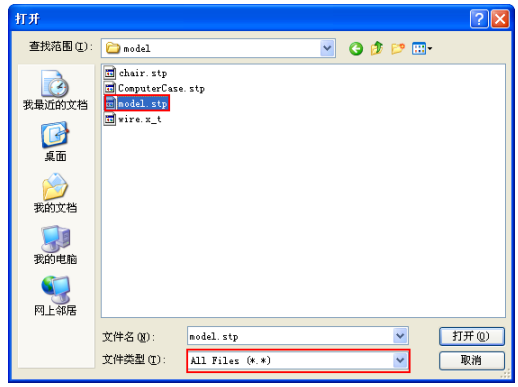


图 3-37　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A3 Geometry 选项，此时会进入到 DesignModeler 界面，此时设计树中 Import1 前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 3-38 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 3-39 所示，此

时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

Step5：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

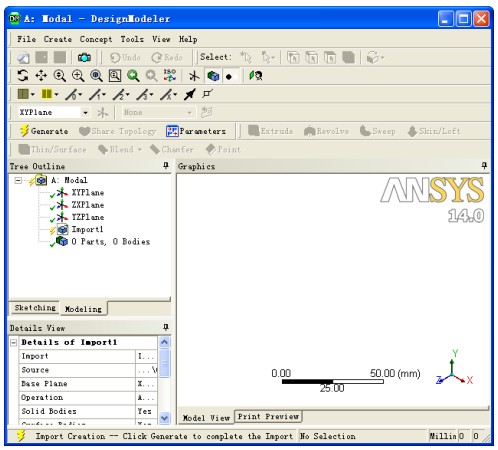


图 3-38　生成前的 DesignModeler 界面

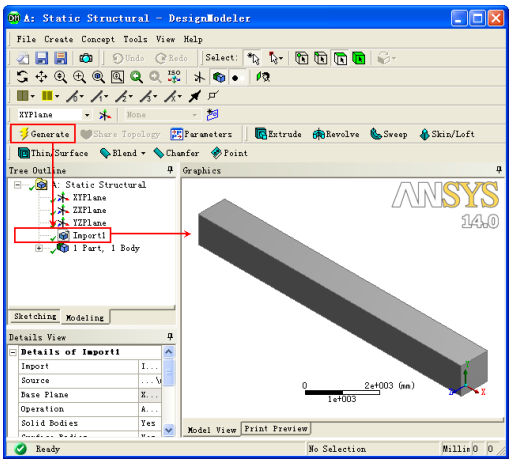


图 3-39　生成后的 DesignModeler 界面

4. 添加材料库

Step1：双击项目 A 中的 A2Engineering Data 选项，进入如图 3-40 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

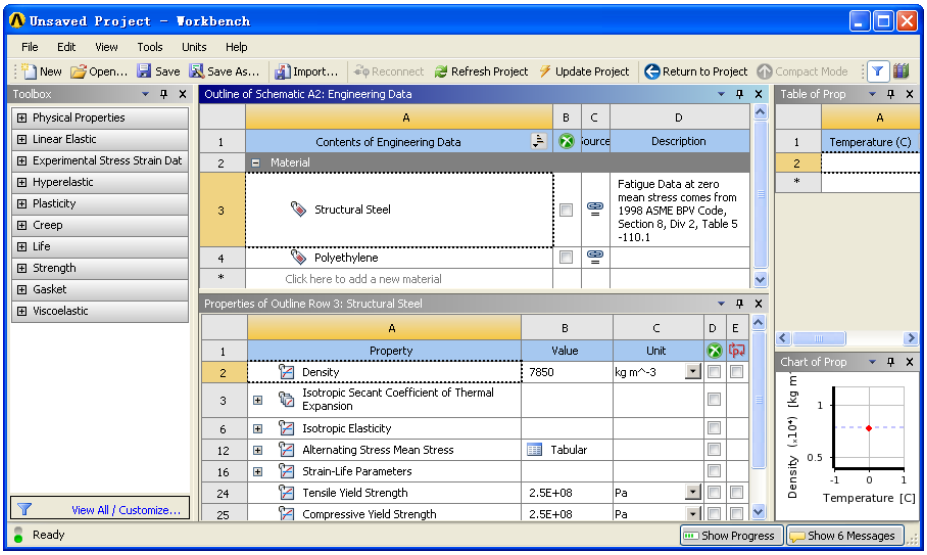


图 3-40　材料参数设置界面（一）

Step2：在界面的空白处右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 3-41 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

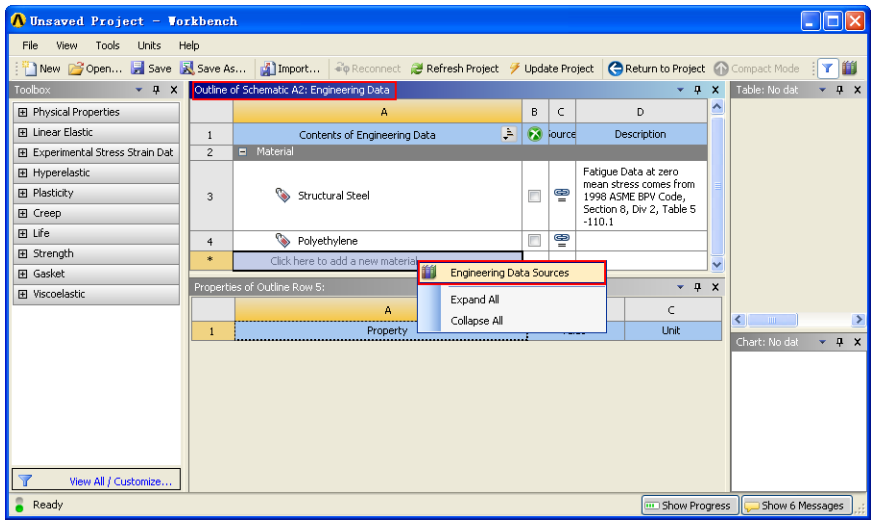


图 3-41　材料参数设置界面（二）

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A5 栏 Aluminum Alloy（铝合金）后的 B5 栏的（添加）按钮，此时在 C5 栏中会显示（使用中的）标识，如图 3-42 所示，标识材料添加成功。

Step4：同步骤 Step2，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 3-43 所示，本实例采用的是默认值。

提 示

用户也可以通过在 Engineering Data 窗口中自行创建新材料添加到模型库中，在后面的讲解中会有涉及，本实例不介绍。

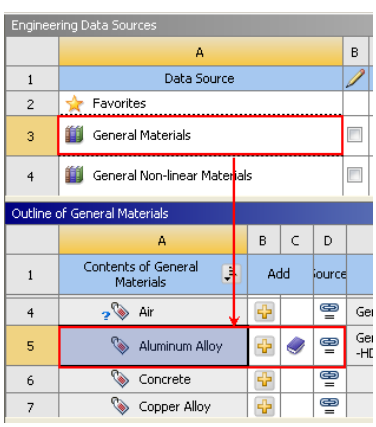


图 3-42　添加材料

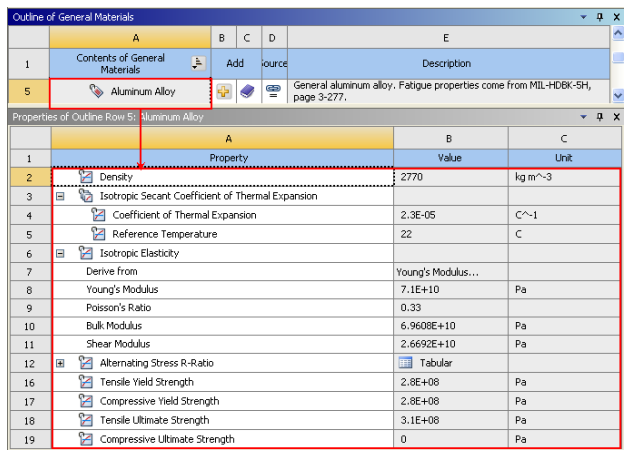


图 3-43　材料参数修改窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

5. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏 Model 选项，进入如图 3-44 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

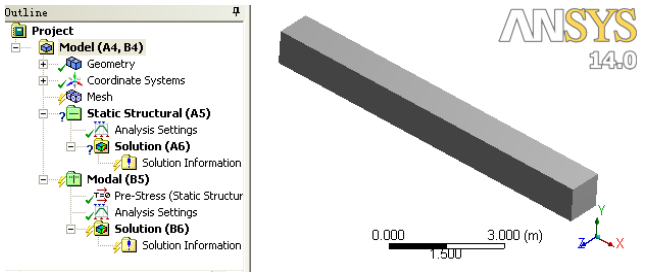
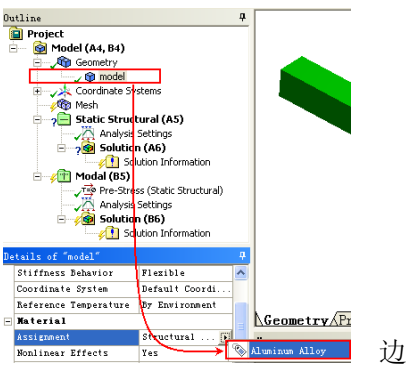


图 3-44　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中 Geometry 选项下的 model，此时即可在 Details of “model”（参数列表）中给模型添加材料，如图 3-45 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 后的按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Stainless Steel，选择即可将其添加到模型中去。此时分析树 Geometry 前的?变为✓，如图 3-46 所示，表示材料已经添加成功。



边

图 3-45　添加材料

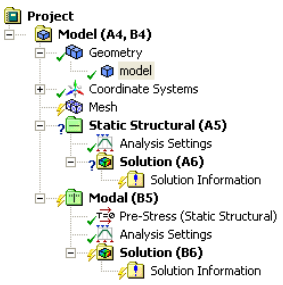


图 3-46　添加材料后的分析树

6. 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 3-47 所示，在 Element Size 中的设置为 0.1m，其余采用默认设置。

Step2：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 3-47 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 3-48 所示。

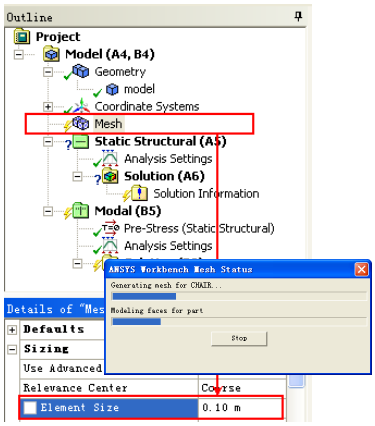


图 3-47　生成网格

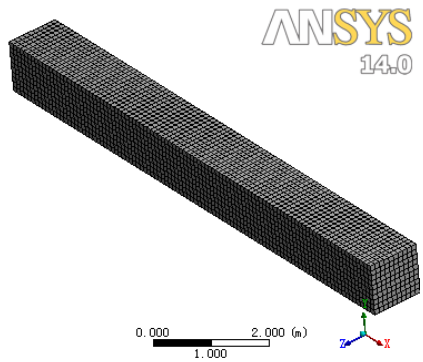


图 3-48　网格效果

7. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项，此时会出现如图 3-49 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 3-50 所示。

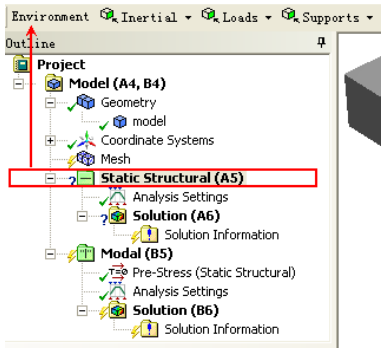


图 3-49　Environment 工具栏

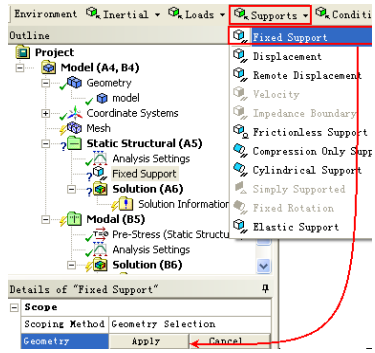


图 3-50　添加固定约束

Step3：选择 Fixed Support 选项，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Fixed Support”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 3-51 所示。

Step4：选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力载荷）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 3-52 所示。

Step5：选择 Force 选项，选择需要施加固定约束的面，单击 Details of “Force”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 3-53 所示。

Step6：在 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 3-54 所示。

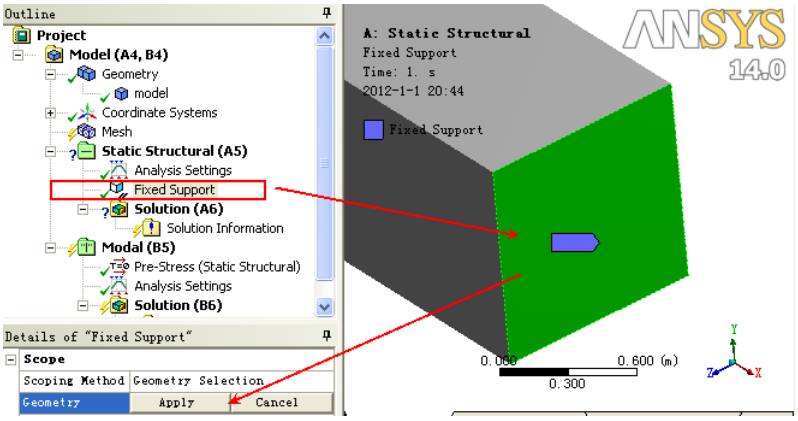


图 3-51　施加固定约束

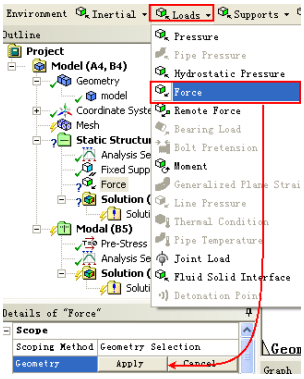


图 3-52　添加固定约束

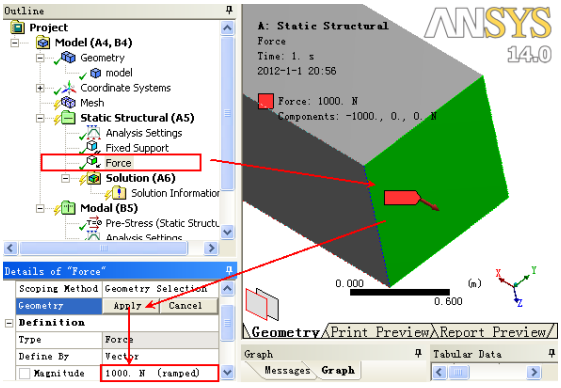


图 3-53　施加载荷

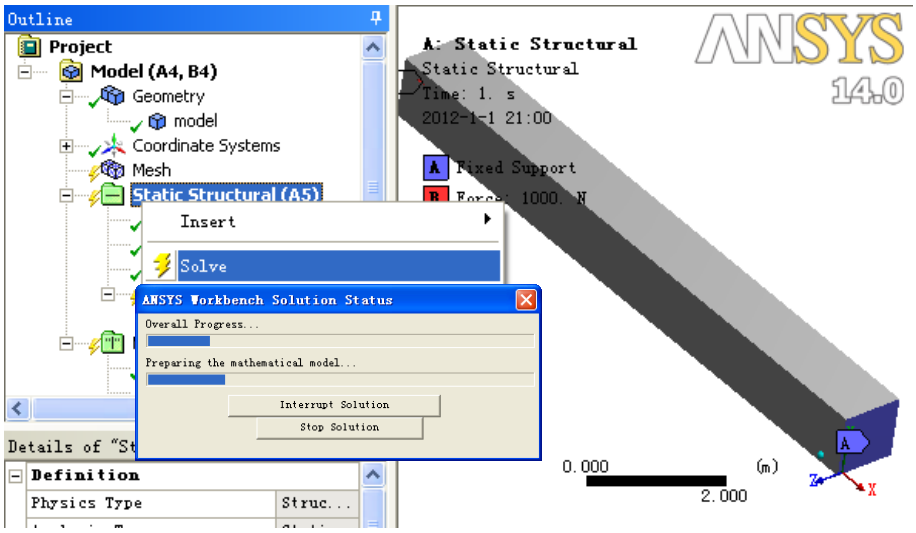


图 3-54　求解

8. 模态分析

在 Outlines（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 3-55 所示。

注 意

计算时间跟网格疏密程度和计算机性能等有关。

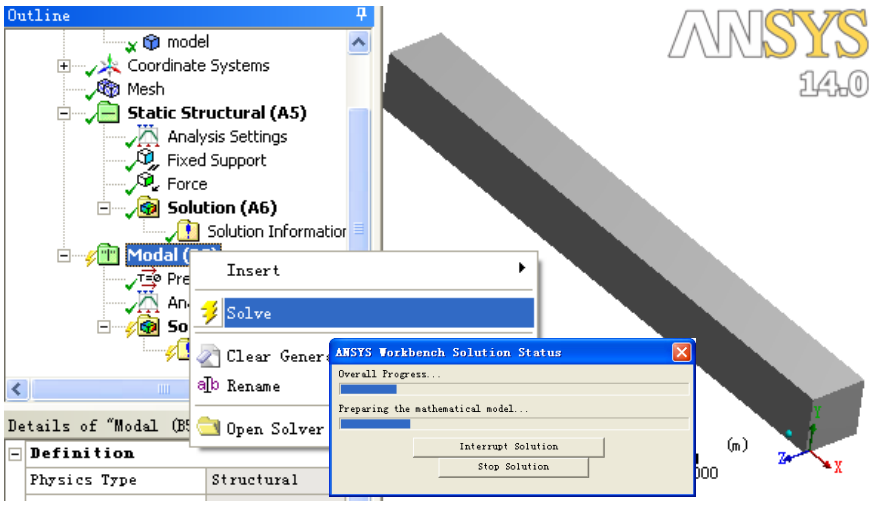


图 3-55　Solution 工具栏

9. 后处理

Step1：选择 Solution（B6）工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 3-56 所示，此时，在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

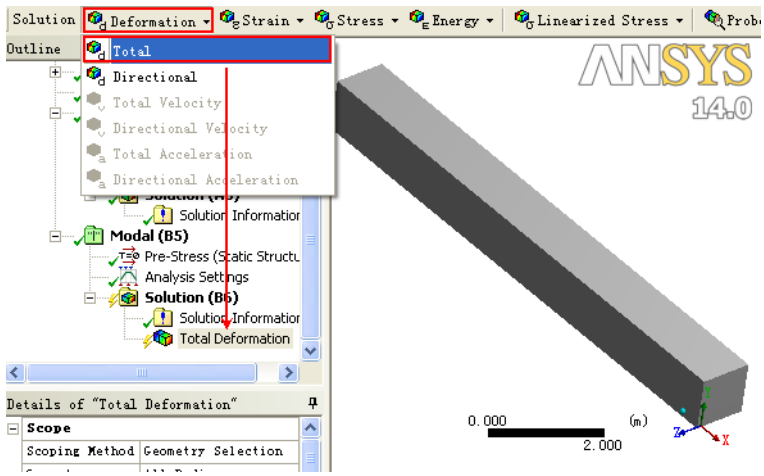


图 3-56　添加变形选项

Step2：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡Evaluate All Results 命令，如图 3-57 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

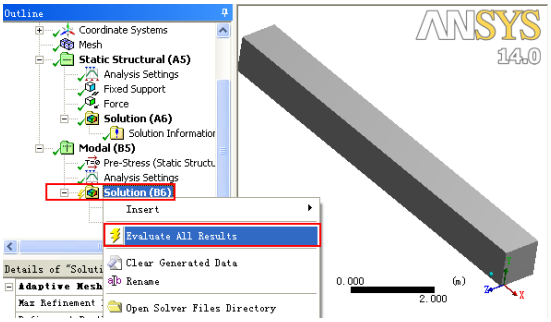


图 3-57　快捷菜单

Step3：选择 Outline（分析树）中 Solution 下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 3-58 所示的一阶模态总变形分析云图。

Step4：图 3-59 所示为二阶模态总变形分析云图。

Step5：图 3-60 所示为三阶模态总变形分析云图。

Step6：图 3-61 所示为四阶模态总变形分析云图。

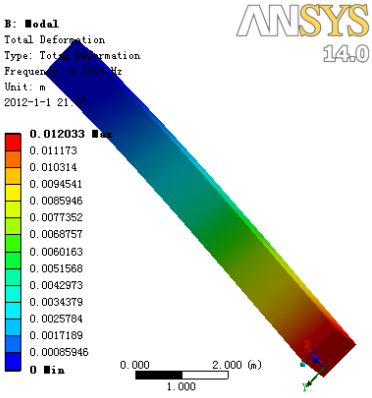


图 3-58　一阶预压应力振型

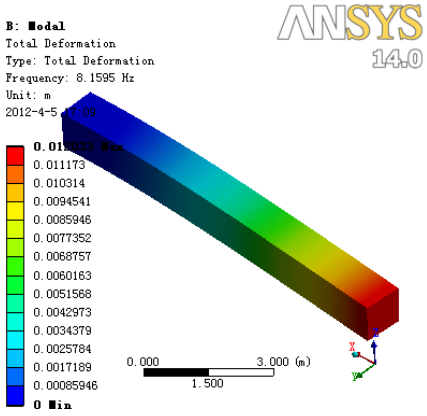


图 3-59　二阶预压应力振型

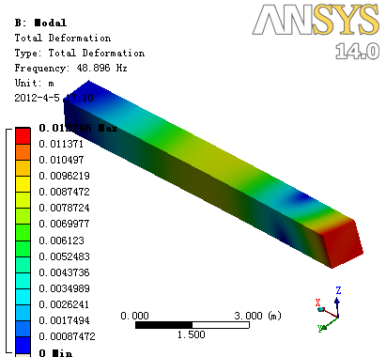


图 3-60　三阶预压应力振型

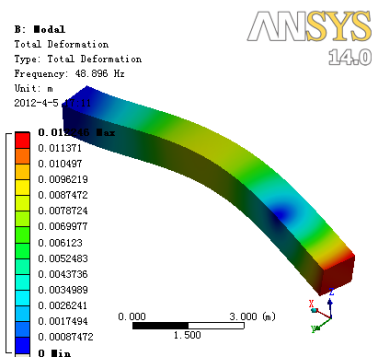


图 3-61　四阶预压应力振型

Step7：图 3-62 所示为五阶模态总变形分析云图。

Step8：图 3-63 所示为六阶模态总变形分析云图。

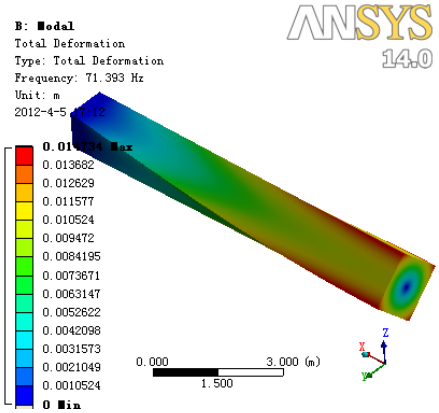


图 3-62　五阶预压应力振型

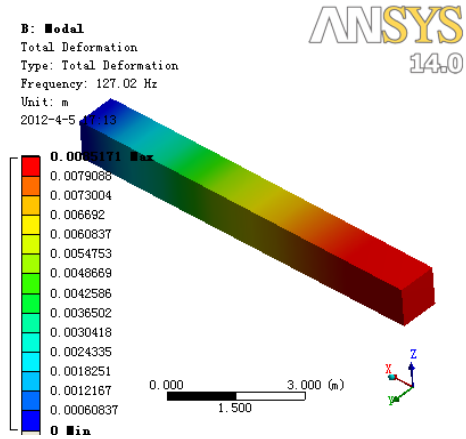


图 3-63　六阶预压应力振型

前六阶变形总结见表 3-1。

表 3-1　振型表

振型	1	2	3	4	5	6
位移	0.0120m	0.0120m	0.0122m	0.0122m	0.0147m	0.0085m
变化方向	*Y* 和-*Z* 轴线 45° 方向弯曲变形	*Y* 和 *Z* 轴线 45° 方向弯曲变形	*Z* 方向弯曲变形	*Y* 方向弯曲变形	*X* 方向扭转变形	*X* 方向压缩变形

Step9：如图 3-64 所示为模型前六阶模态频率，Workbench 模态计算时的默认模态数量为 6。

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	8.1595
2	2.	8.1595
3	3.	48.898
4	4.	48.898
5	5.	71.393
6	6.	127.02

图 3-64　各阶模态频率

10. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 3-65 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

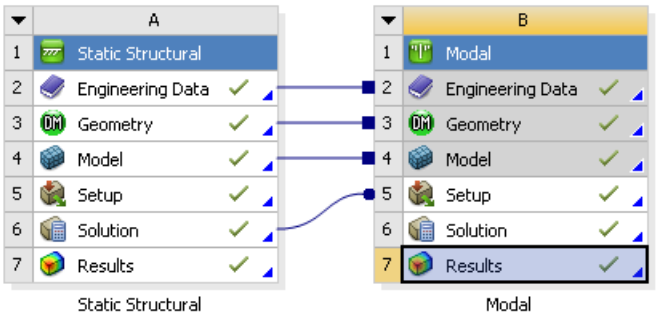


图 3-65　项目管理区中的分析项目

3.4　项目案例 3——制动鼓模态分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的模态分析模块，将通过一个制动鼓模态分析例子来帮助读者学习模态分析的操作步骤。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 模态分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ zhidonggu.x_t
结果文件	光盘\example\ zhidonggu.x_t.wbpj

1. 问题描述

鼓式制动器是汽车制动系统最常用的模块之一，如图 3-66 所示。而制动鼓又是鼓式制动器重要的组成部分之一，制动鼓的模态常作为一个重要的设计指标被提出。在本例中假定制动鼓材料为铸铁，分析其前五阶的模态。

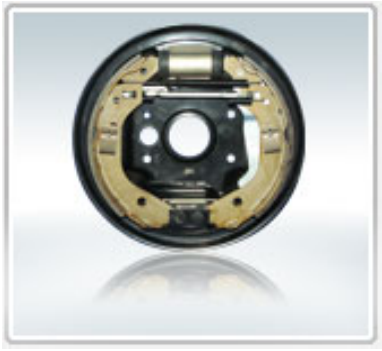


图 3-66　制动鼓模型

2. 添加材料和导入模型

Step1：在主界面中建立分析项目，项目为模态分析（Modal）。双击分析系统 Modal 选项，生成静态结构分析项目，如图 3-67 所示。

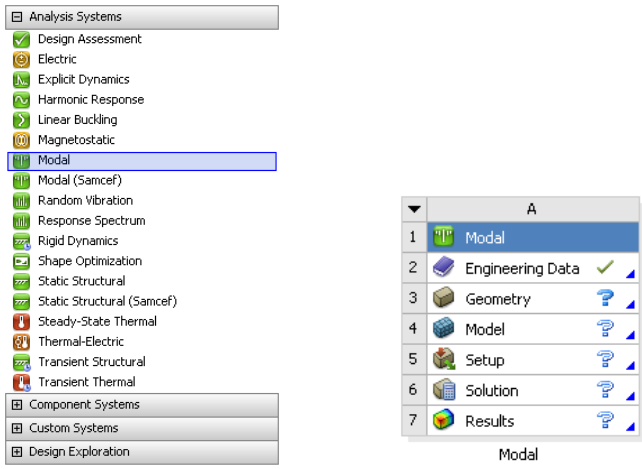


图 3-67　模态分析项目

Step2：双击 A 项目下部 Modal 选项，将分析项目名更改为“制动鼓模态”，如图 3-68 所示。



图 3-68　更改分析项目名称

Step3：双击 A2 栏 Engineering Data 选项，进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

Step4：在界面的空白处右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令。原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

Step5：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A8 栏 Gray Cast Iron（铸铁）后的 B8 栏的（添加）按钮，此时在 C8 栏中会显示（使用中的）标识，如图 3-69 所示，标识材料添加成功。

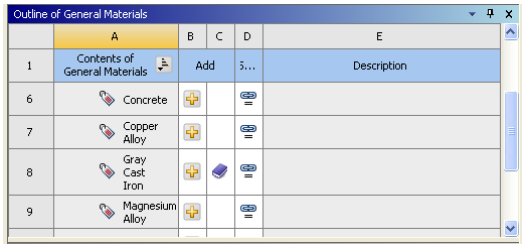


图 3-69　添加材料

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

Step7：在 A3 栏的 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，在弹出的对话框中选择需要导入的模型 zhidonggu.x_t，如图 3-70 所示。

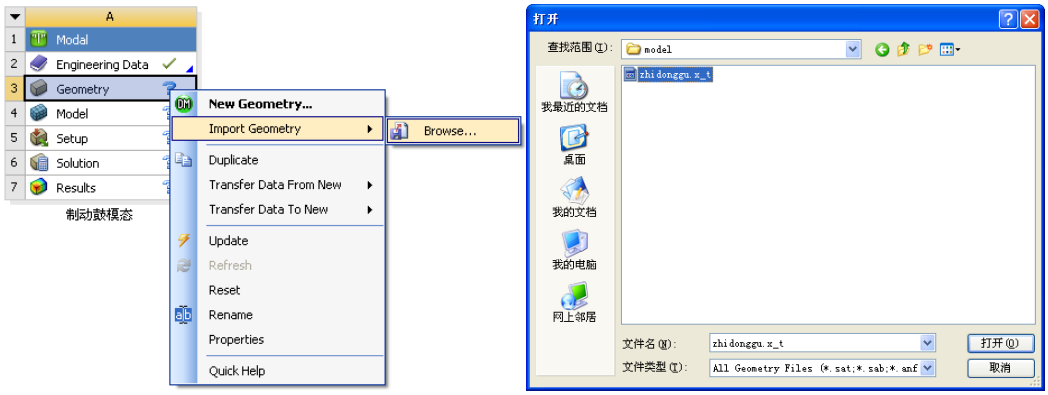


图 3-70　导入模型

3. 赋予材料和划分网格

Step1：双击分析项目中 A4 栏 Model 选项，打开 Mechanical 界面。

Step2：单击 Outline 栏 Geometry 项前部的 ⊞ 按钮，选择 Prat 1 选项，如图 3-71 所示。

Step3：单击 Details of “Part 1”栏中 Assignment 项后 ▸ 按钮，如图 3-72 所示。选择 Gray Cast Iron 选项。

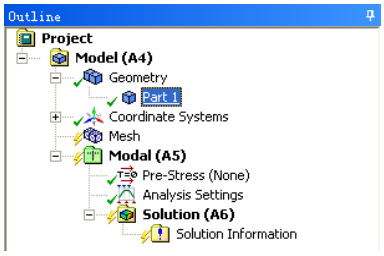


图 3-71　选择 Part 1

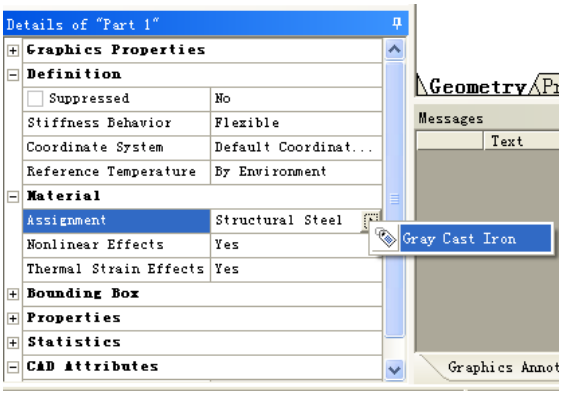


图 3-72　更改材料

Step4：选择 Outline 栏目中的 Mesh 选项，如图 3-73 所示，此时会出现网格参数设置列表。

Step5：在网格参数设置列表中单击 Details of “Mesh”栏目中 Sizing 选项。在 Element Size 选项中 Default 输入 30，如图 3-74 所示。

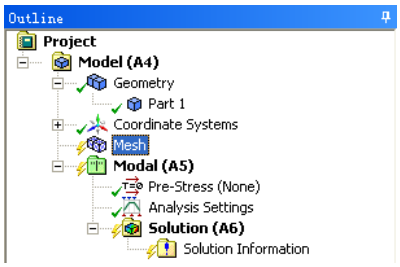


图 3-73　选择 Mesh

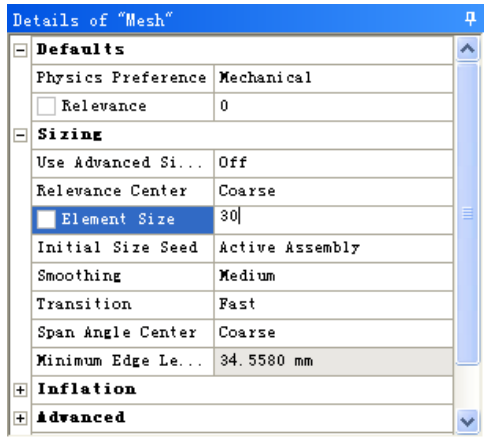


图 3-74　设置网格尺寸

Step6：在 Outline 栏中 Mesh 选项上右击，选择 Generate Mesh 命令，划分网格，如图 3-75 所示。划分后网格如图 3-76 所示。

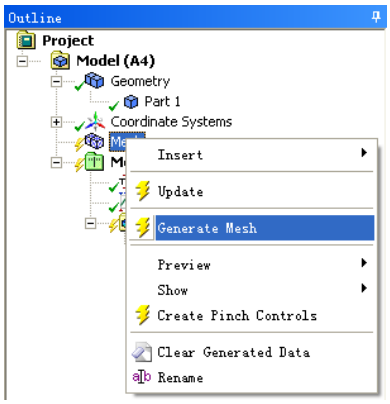


图 3-75　网格划分

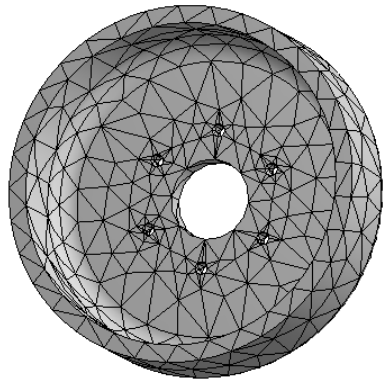


图 3-76　网格

4. 添加约束和载荷

Step1：选择 Outline 栏目中 Modal（A5）选项，如图 3-77 所示，此时会出现如图 3-78 所示的 Environment（环境）工具栏。

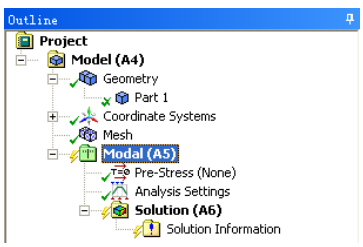


图 3-77　边界条件选项



图 3-78　环境工具栏

Step2：选择 Environment（环境）工具栏中的 Supports 菜单，在下拉菜单中选择 Fixed

Support 命令，如图 3-79 所示。

Step3：按住 Ctrl 键，选择制动鼓的 6 个螺栓孔，如图 3-80 所示。在 Details of “Fixed Support”栏中，单击 Geomtry 中的 Apply 按钮，如图 3-81 所示。

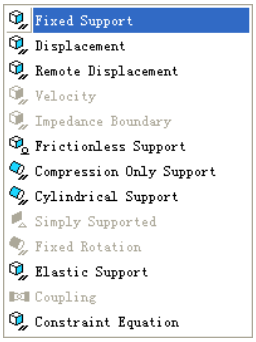


图 3-79　选择约束

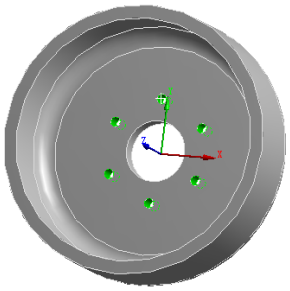


图 3-80　选择约束面

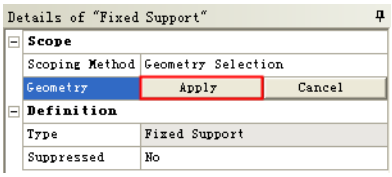


图 3-81　位移约束参数设置

Step4：选择 Outline 栏 Modal（A5）项中 Analysis Settings 选项，此时会出现 Details of “Analysis Settings”栏，如图 3-82 所示。

Step5：在 Details of “Analysis Settings”栏 Max Modes Find 项中输入 5，如图 3-83 所示，输入后按回车键。

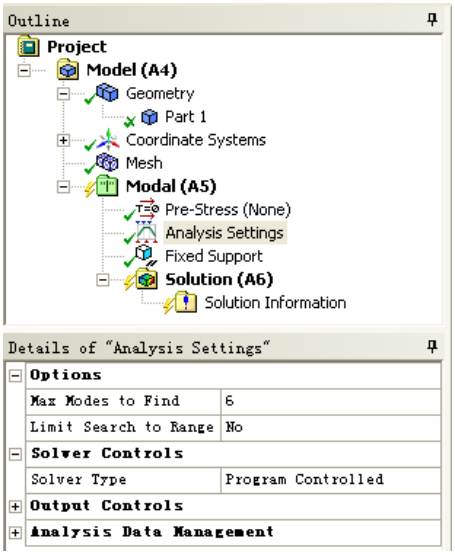


图 3-82　分析设置

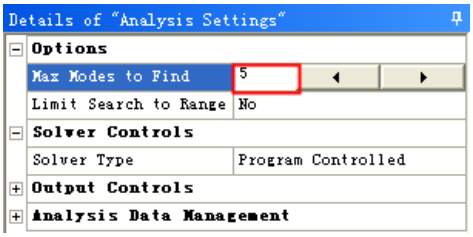


图 3-83　设置模态阶数

5. 求解

在 Outline 栏中 Solution（A6）项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 3-84 所示。求解时会出现进度栏。当进度栏消失，同时 Solution（A6）项前方出现 ✓ 标识，说明求解已经结束，如图 3-85 所示。

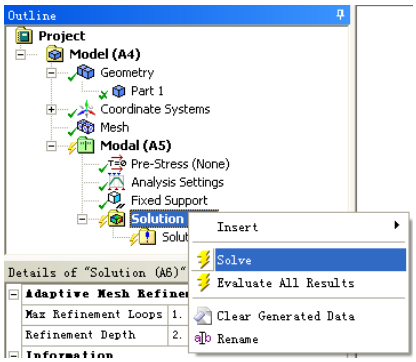


图 3-84　求解

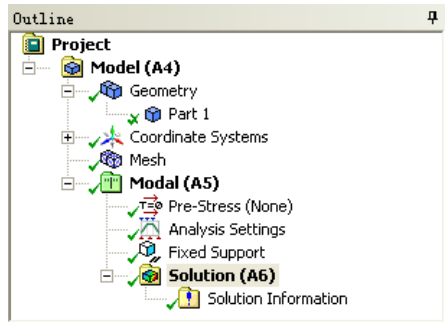


图 3-85　求解完成

6. 后处理

Step1：求解完成之后已经可以在界面右下角看到计算结果，为前五阶的频率，如图 3-86 所示。

Tabular Data

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	726.75
2	2.	728.72
3	3.	861.11
4	4.	862.09
5	5.	1077.8

图 3-86　前五阶频率

Step2：按住 Shift 键选中这五个频率，右击后选择 Create Mode Shape Results 命令，创建振型，如图 3-87 所示。

Step3：在 Outline 栏中 Solution（A6）项上右击，选择 Evaluate All Results 命令显示结果，如图 3-88 所示。

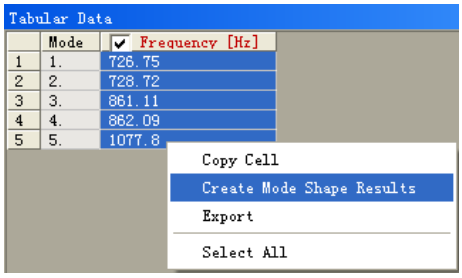


图 3-87　创建振型

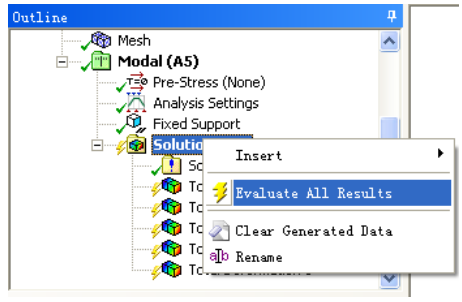


图 3-88　提取求解结果

Step4：在 Outline 栏中 Solution（A6）中 Total Deformation 选项上单击，显示第一阶振形结果，如图 3-89 所示。单击 Graph 栏中▶按钮，显示第一阶振形动画，如图 3-90 所示。

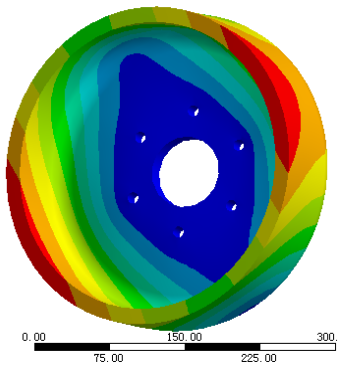


图 3-89　第一阶振形

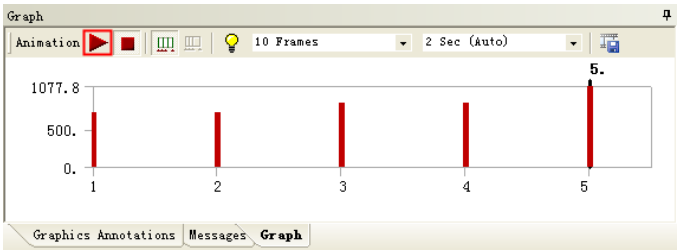


图 3-90　显示振形动画

Step5：单击 Graph 栏中按钮，可将振形动画保存到指定位置，如图 3-91 所示。

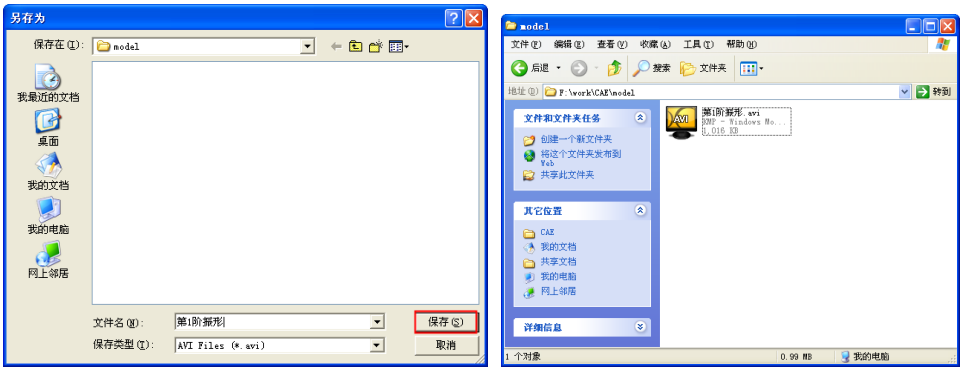


图 3-91　保存振形动画

Step6：在 Outline 栏中 Solution（A6）中 Total Deformation 2 选项上单击，显示第二阶振形结果，如图 3-92 所示。

Step7：在 Outline 栏中 Solution（A6）中 Total Deformation 2 选项上单击，显示第三阶振形结果，如图 3-93 所示。

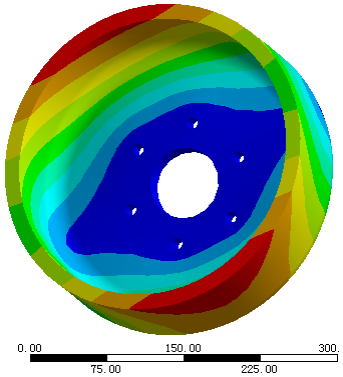


图 3-92　第二阶振形

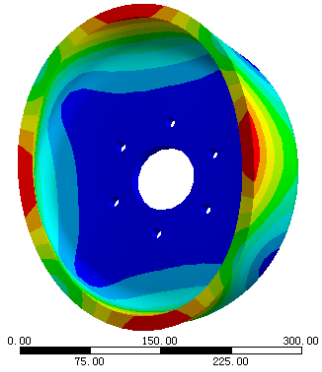


图 3-93　第三阶振形

Step8：在 Outline 栏中 Solution（A6）中 Total Deformation 2 选项上单击，显示第四阶振形结果，如图 3-94 所示。

Step9：在 Outline 栏中 Solution（A6）中 Total Deformation 2 选项上单击，显示第五阶振形结果，如图 3-95 所示。

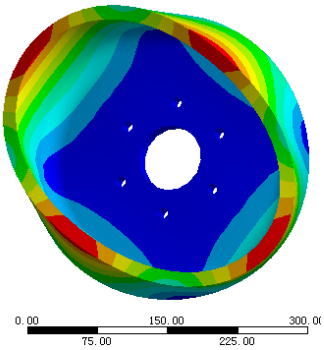


图 3-94　第四阶振形

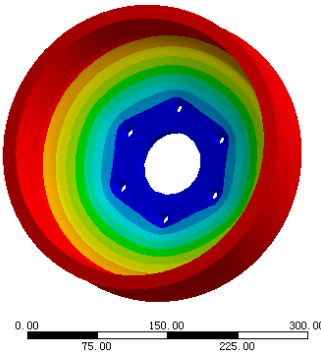


图 3-95　第五阶振形

有兴趣的读者可以将网格设为更细，如设为 10，划分后网格如图 3-96 所示。可再次计算结果，如图 3-97 所示。

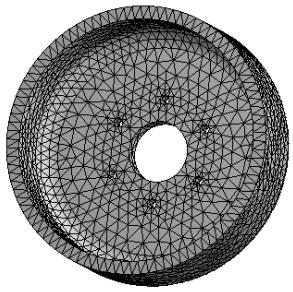


图 3-96　细网格

Tabular Data

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	713.86
2	2.	714.
3	3.	842.41
4	4.	842.47
5	5.	1047.8

图 3-97　细网格计算结果

7. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的按钮，退出 Mechanical 返回 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 3-98 所示。



图 3-98　项目分析完成

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save 按钮，保存包含有分析结

果的文件。

Step3：单击主界面右上角的按钮，退出 Workbench，完成项目分析。

3.5 本章小结

本章节用了两个典型案例详细介绍了 ANSYS Workbench14.0 软件的模态分析模块，包括模态分析的建模方法、网格剖分、边界条件的施加，同时还详细介绍了含有预应力的模态分析的分析方法及操作步骤。

通过本章节的学习，读者应该对模态分析的过程有详细的了解，包括有预应力的模态分析。同时应该对模态分析的应用场合有基本了解。

第 4 章

谐响应分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的谐响应分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对谐响应分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件谐响应分析的过程。

（2）了解谐响应分析与结构静力学分析的不同之处。

（3）了解谐响应分析的应用场合。

4.1 谐响应分析简介

谐响应分析也称为频率响应分析或者扫频分析，它是一种特殊的时域分析，计算结构在正弦激励（激励随时间呈正弦规律变化）作用下的稳态振动，也就是受迫振动分析，可以计算响应幅值、频率等。

1. 谐响应分析

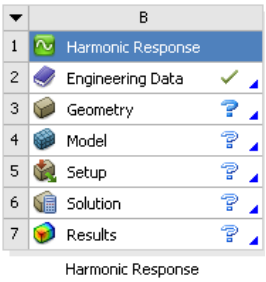


图 4-1　谐响应分析流程

谐响应分析由于激励是简谐变化的，所以计算过程中，只考虑稳态受迫振动，不考虑激励开始瞬间的暂态振动。

谐响应分析应用很广，例如，旋转机械的偏心转动力将产生简谐载荷，因此，旋转机械（如空气压缩机、发动机、汽轮机等）的支撑位置等经常需要用谐响应分析来分析它们在各种不同频率和幅值的偏心简谐激励作用下的强度。

图 4-1 所示为 ANSYS Workbench 14.0 平台进行谐响应分析的分析环境项目流程图，依次设置 A2～A7 表格项即可完成谐响应分析。

2. 谐响应分析基础

经典力学理论可知，物体的动力学通用方程为

$$[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}''\}+[\boldsymbol{C}]\{\boldsymbol{x}'\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{F}(t)\} \tag{4-1}$$

式中，$[\boldsymbol{M}]$ 是质量矩阵；$[\boldsymbol{C}]$ 是阻尼矩阵；$[\boldsymbol{K}]$ 是刚度矩阵；$\{\boldsymbol{x}\}$ 是位移矢量；$\{\boldsymbol{F}(t)\}$ 是

力矢量；$\{x'\}$是速度矢量；$\{x''\}$是加速度矢量。

而谐响应分析中，上式右侧为

$$F = F_0 \cos(\omega t) \tag{4-2}$$

下面通过几个简单的实例介绍一下静力分析的方法和步骤。

4.2 项目案例 1——机箱谐响应分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的谐响应分析模块，对计算机箱进行谐响应分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 谐响应分析的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	光盘\example\ Harmonic Response.wbpj

1. 问题描述

如图 3-3 所示为某计算机机箱模型，计算机箱底面固定，受到 Z 向简谐加速度加载激励，载荷幅值为 20m/s^2，频率范围为 10～200Hz，频率步为 10Hz，请用 ANSYS Workbench 分析计算机箱在周期性外载荷作用下的相应分析。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：如图 4-2 所示，单击 Workbench 窗口中的 Open... 按钮，在“打开”对话框中选择 Modal 文件，单击“打开”按钮，读入模态分析工程文件。

Step3：如图 4-3 所示，单击 Workbench 窗口中的 Save As... 按钮，在“另存为”对话框中输入文件名 Harmonic Response，单击“保存”按钮，保存工程文件。

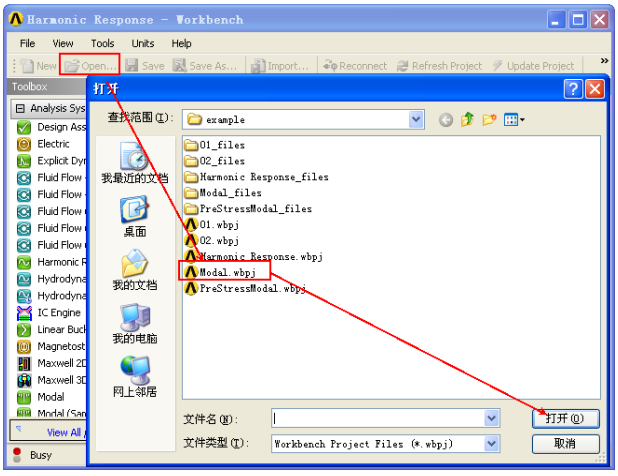


图 4-2　打开模型文件

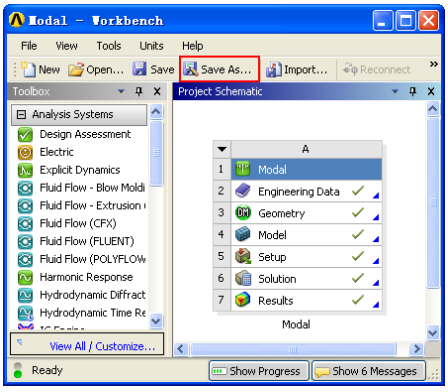


图 4-3　保存工程文件

3. 创建谐响应项目

Step1：如图 4-4 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Harmonic Response（谐响应分析）选项直接拖曳到项目 A（模态分析）的 A6Solution 中。

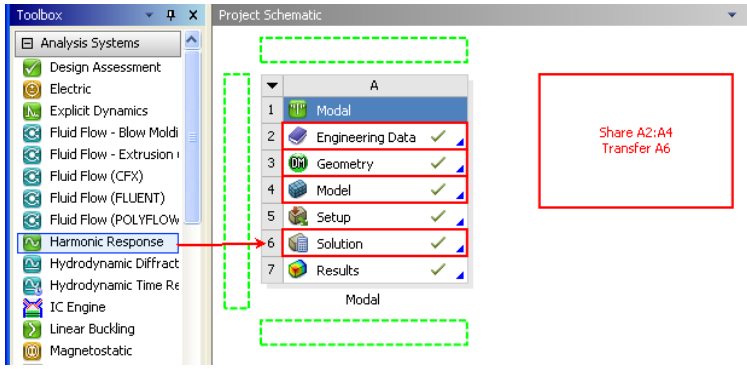


图 4-4　创建谐响应分析

Step2：如果 4-5 所示，此时，项目 A 的所有前处理数据已经全部导入项目 B 中，此时，如果双击项目 B 中的 B5Setup 选项即可直接进入 Mechanical 界面。

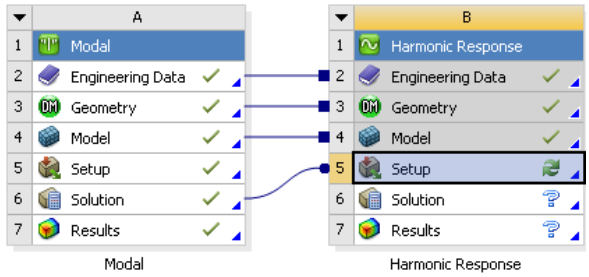


图 4-5　工程数据共享

4. 施加载荷与约束

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B5 栏 Setup 选项，进入如图 4-6 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

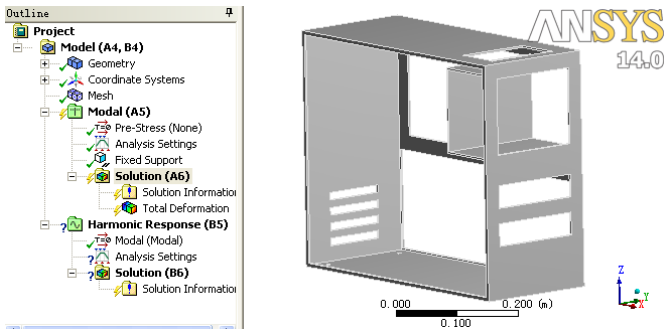


图 4-6　Mechanical 界面

注 意

材料属性已经在模态分析时被赋予，网格划分已经在模态分析中完成，所以在谐响应分析中不需要再设定。

Step2：如图 4-7 所示，在 Outline（分析树）中的 Modal（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step3：如图 4-8 所示，在 Outline（分析树）中的 Harmonic Response（B5）→Analysis Settings 选项单击，在下面出现的 Details of “Analysis Settings”选项的 Options 中做如下更改。

在 Range Minimum 中输入 10Hz，在 Range Maximum 中输入 200Hz，在 Solution Interval 中输入 10。

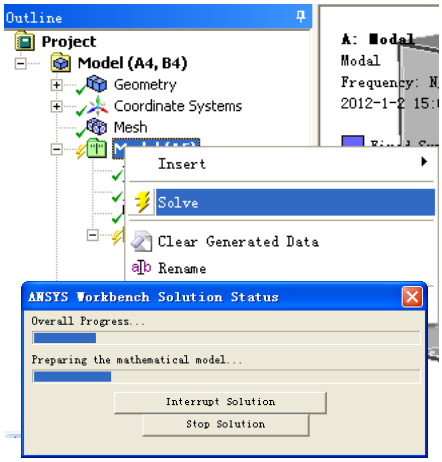


图 4-7　模态计算

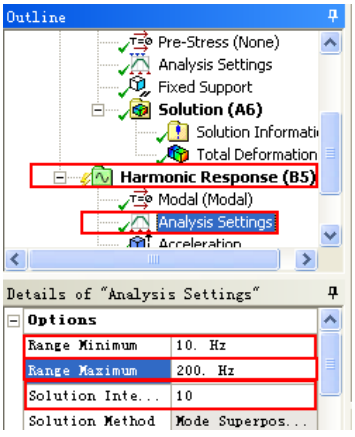


图 4-8　频率设定

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Harmonic Response（B5）选项，如图 4-9 所示，选择 Environment 工具栏中的 Inertial（惯性）→Acceleration（加速度）命令，此时在分析树中会出现 Acceleration 选项。

Step5：如图 4-10 所示，选择 Acceleration 选项，默认也将计算机箱选中，选择 Details of “Acceleration”中 Definition→Define By 选项，并在选项中选择 Components，然后在下面 Z Component 中输入−20m/s^2 完成加速度的设置。

Step6：在 Outline（分析树）中的 Harmonic Response（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 4-11 所示。

5. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 4-12 所示的 Solution 工具栏。

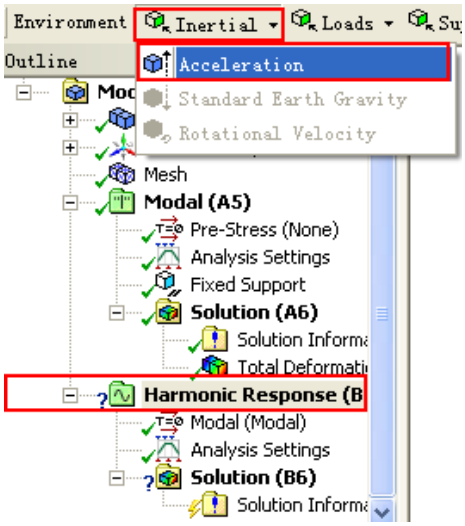


图 4-9　施加惯性力

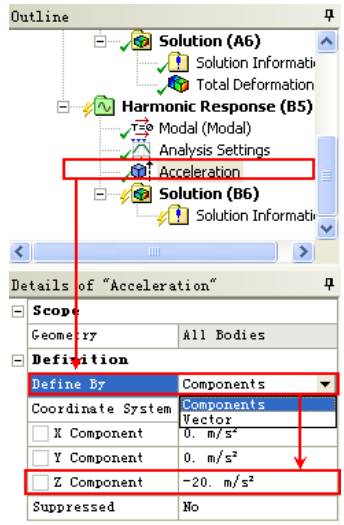


图 4-10　数值设定

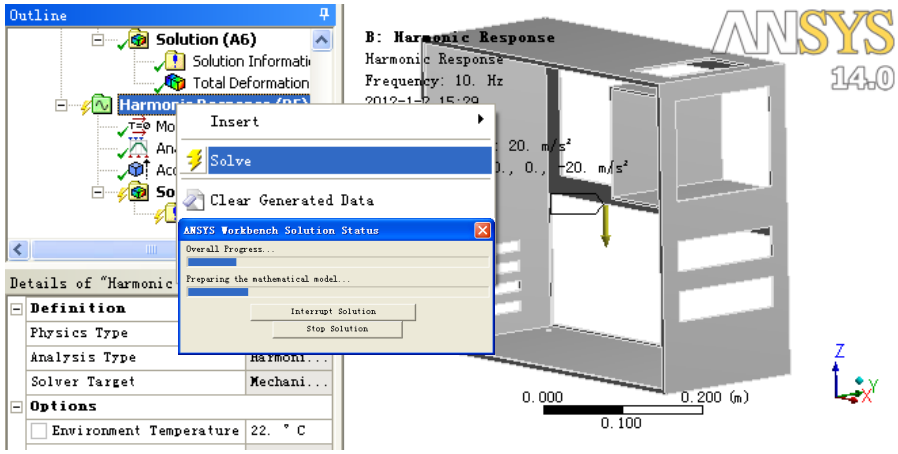


图 4-11　求解

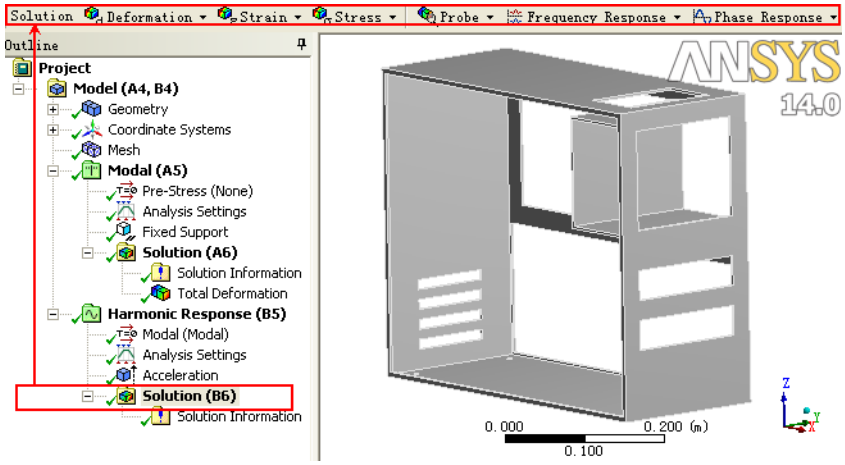


图 4-12　Solution 工具栏

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 4-13 所示，此时，在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

Step3：选择 Solution 工具栏中的 Total Deformation（总变形）选项，在如图 4-14 所示的 Details of “Total Deformation”中的 Definition→By 中选择 Set 选项，并在 Set Number 中输入 1。

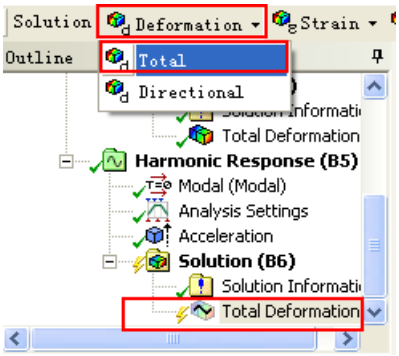


图 4-13　添加变形选项

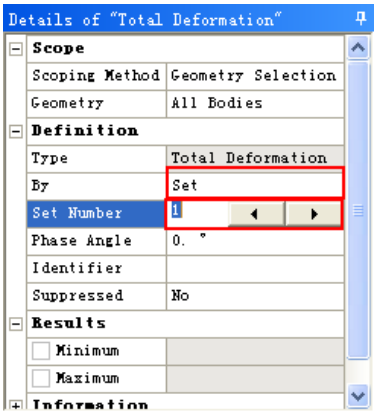


图 4-14　设置频率

Step4：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 4-15 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step5：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 4-16 所示的一阶模态总变形分析云图。

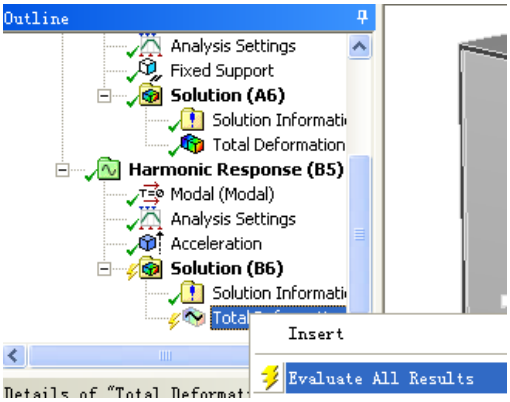


图 4-15　快捷菜单

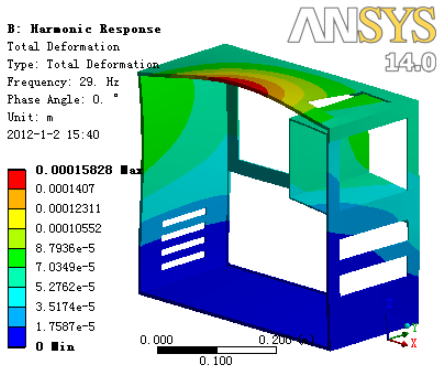


图 4-16　一阶变形

Step6：如图 4-17 所示为计算机机箱各阶响应频率。

Step7：通过设置不同频率，观察各个频率下的总位移响应，可知当频率为 86Hz 时位移响应值最大，其位移响应云图如图 4-18 所示。

Step8：选择 Solution 工具栏中的 Frequency Response（频率响应）→Deformation 命令，如图 4-19 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

	Set	Frequency [Hz]
1	1.	29.
2	2.	48.
3	3.	67.
4	4.	86.
5	5.	105.
6	6.	124.
7	7.	143.
8	8.	162.
9	9.	181.
10	10.	200.

图 4-17　各阶响应频率

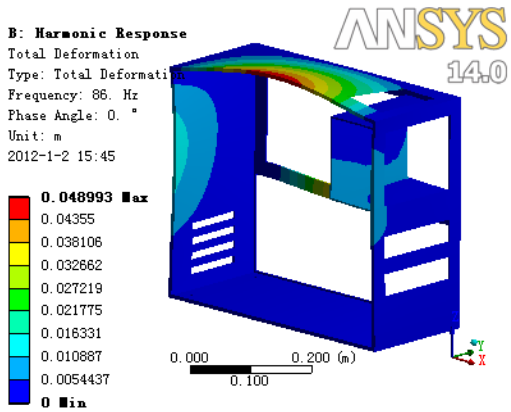


图 4-18　86Hz 时总位移响应

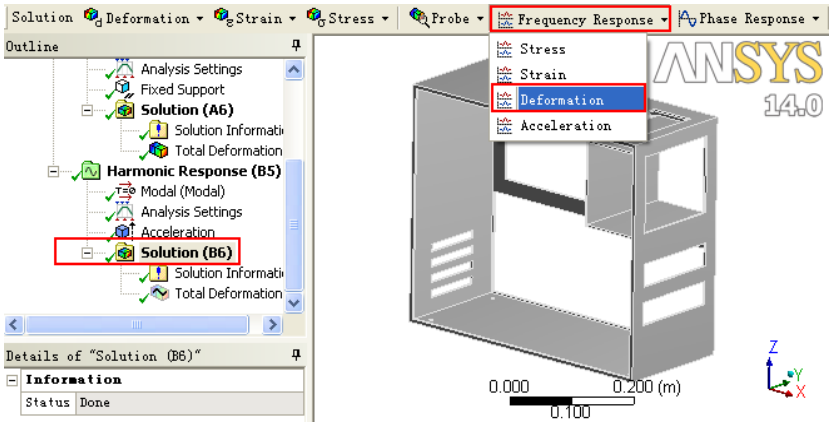


图 4-19　频率响应设定

Step9：如图 4-20 所示，在出现的 Details of “Frequency Response”面板中，选择计算机箱的上表面，单击 Apply 按钮，单击工具栏中的 Solve 按钮，执行运算。

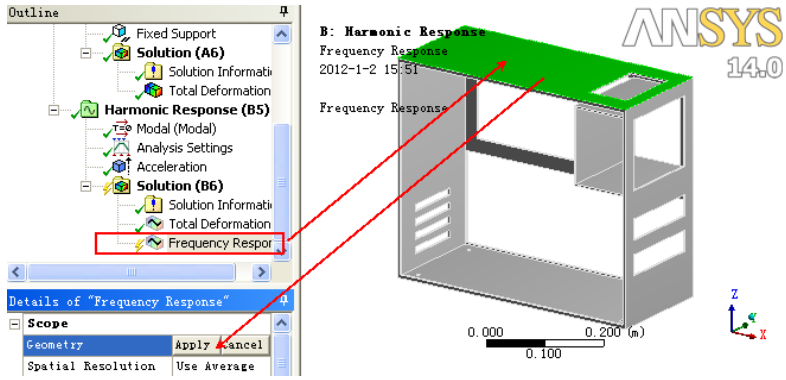


图 4-20　位移响应面设定

Step10：如图 4-21 所示，计算机箱上表面谐响应结果。

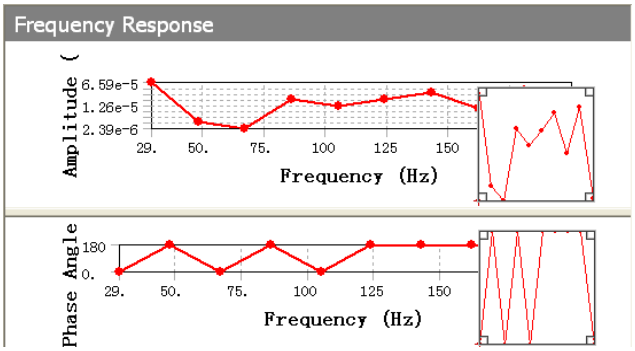


图 4-21　Frequency Response 结果

6. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 4-22 所示。

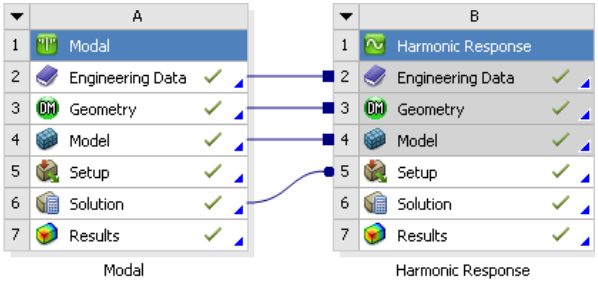


图 4-22　项目管理区中的分析项目

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

4.3　项目案例 2——齿轮箱谐响应分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的谐响应分析模块，对齿轮箱进行谐响应分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 带接触的谐响应分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ chinlunxiang_asm.stp
结果文件	光盘\example\ chilunxiang_modal.wbpj

1. 问题描述

如图 4-23 所示为某齿轮箱模型，计算齿轮箱底部四个螺栓孔固定，当大齿轮孔位置受到 500N·m 小齿轮孔受到 300N·m 转矩作用时（两转矩方向相反），请用 ANSYS Workbench 分析齿轮箱的响应情况。

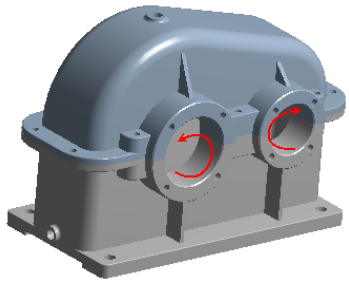


图 4-23　齿轮箱模型

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：选择 Toolbox→Component Systems→Geometry 命令，此时会在工程管理窗口中出现项目 A（Geometry）流程表，如图 4-24 所示，右击 A2（Geometry）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry…→Browse…命令。

Step3：在弹出的如图 4-25 所示的“打开”对话框中做如下设置。

① 在文件类型栏中选择（STEP）格式文件类型，即*.stp。

② 选择 chinlunxiang_asm.stp 文件名，并单击“打开”按钮。

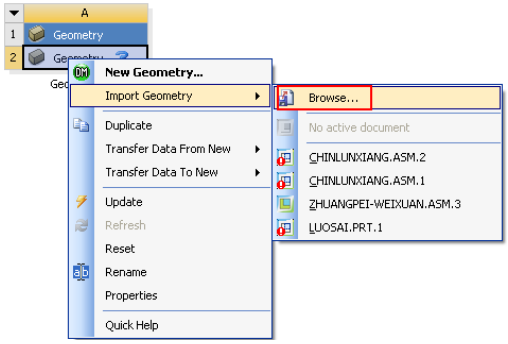


图 4-24　快捷菜单

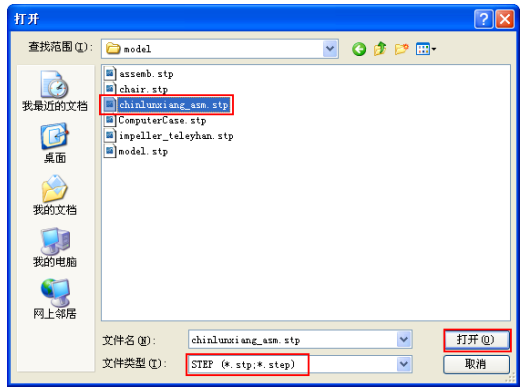


图 4-25　打开模型文件

Step4：如图 4-26 所示，双击项目 A 中的 A2（Geometry）选项，此时会加载 DesignModeler 平台，同时弹出“单位设置”对话框，将单位设置为 mm，关闭“单位设置”对话框。

Step5：单击工具栏中的 Generate 按钮，如图 4-27 所示，此时导入的几何文件将被加载。

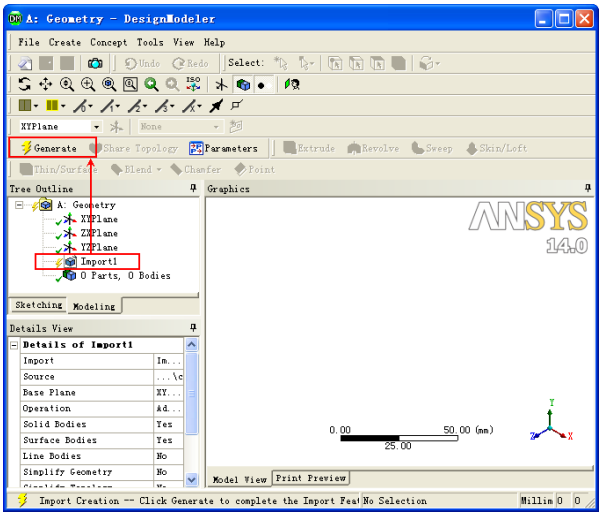


图 4-26　生成几何

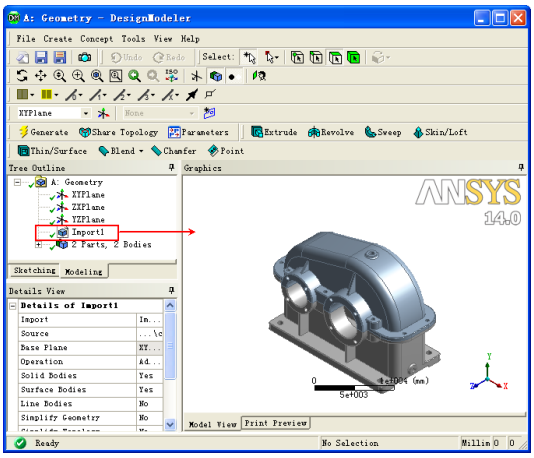


图 4-27　几何模型

Step6：单击按钮关闭 DesignModeler 平台。

3. 创建模态分析项目

Step1：如图 4-28 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Modal（模态分析）选项直接拖曳到项目 A（几何）的 A2（Geometry）中。

Step2：如图 4-29 所示，此时项目 A 的几何数据将共享在项目 B 中。

4. 材料选择

Step1：双击项目 B 中的 B2（Engineering Data）选项，弹出如图 4-30 所示工程材料库，在工具栏中单击按钮，此时弹出工程材料数据选择库。

Step2：在材料库中选择如图 4-31 所示的 Gray Cast Iron 材料，此时会在 C8 栏中出现图标，表示此材料被选中，返回 Workbench 主窗口。

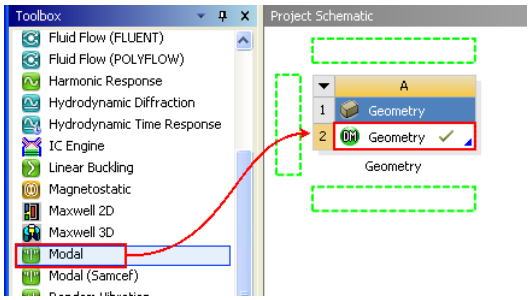


图 4-28　创建模态分析

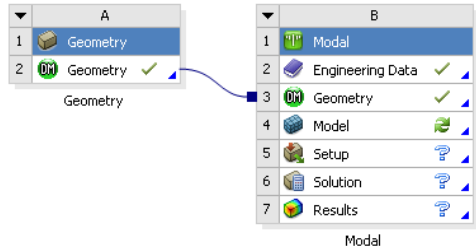


图 4-29　工程数据共享

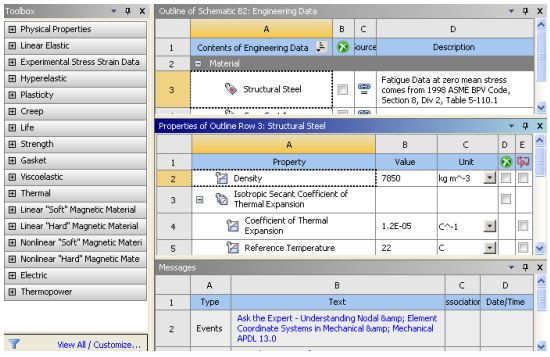


图 4-30　材料库

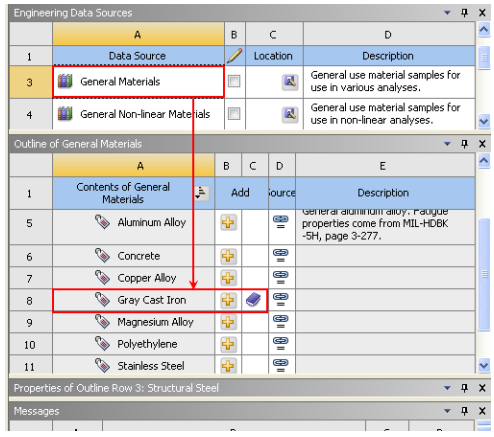


图 4-31　材料选择

5. 施加载荷与约束

Step1：此时双击项目 B 中的 B4（Model）选项，进入如图 4-32 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

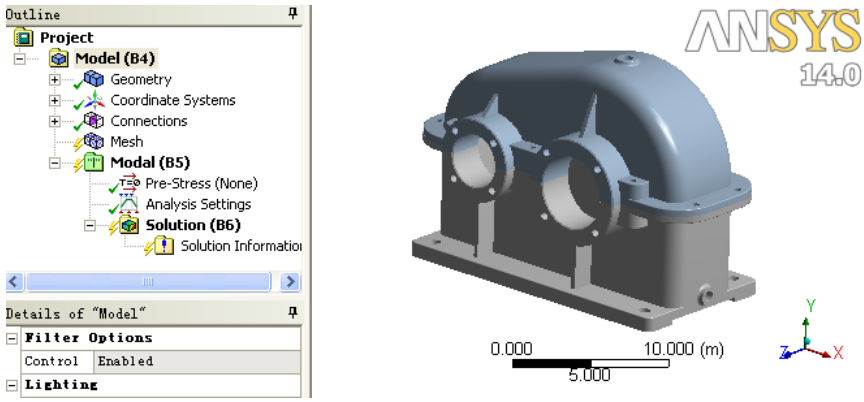


图 4-32　Mechanical 界面

Step2：如图 4-33 所示，在 Outline（分析树）中的 Model（B4）→Geometry 菜单的下面出现的 Details of Geometry 面板中的 Material→Assignment 栏中选择 Gray Cast Iron 选项。

Step3：如图 4-34 所示，在 Outline（分析树）中的 Model（B4）→Connections→Contacts→Contact Region 选项单击，在下面出现的 Details of “Contact Region”选项的 Definition→Type 中选择 Bonded。

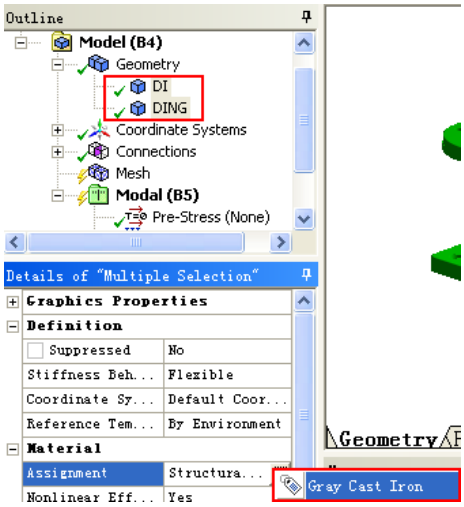


图 4-33　选择材料

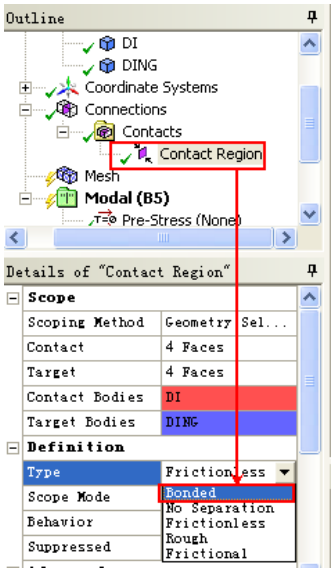


图 4-34　接触设置

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Model（B4）→Mesh 选项，如图 4-35 所示，在下面出现的 Details of “Mesh”面板中的 Sizing→Relevant Center 中选择 Fine。

Step5：如图 4-36 所示，右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分网格。

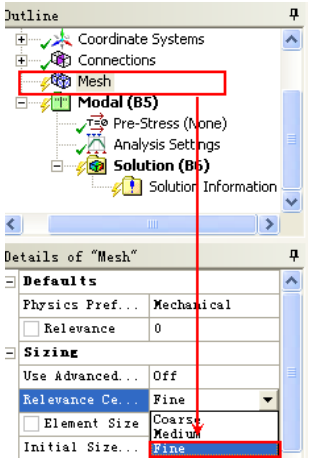


图 4-35　网格设置

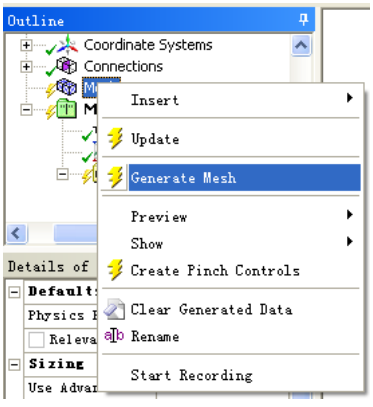


图 4-36　数值设定

Step6：划分完的几何网格模型如图 4-37 所示。

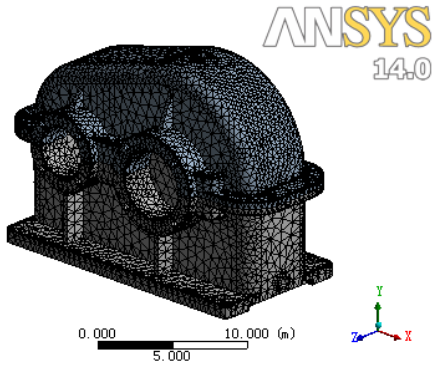


图 4-37　几何网格模型

Step7：单击底部零件的四个通孔，如图 4-38 所示。

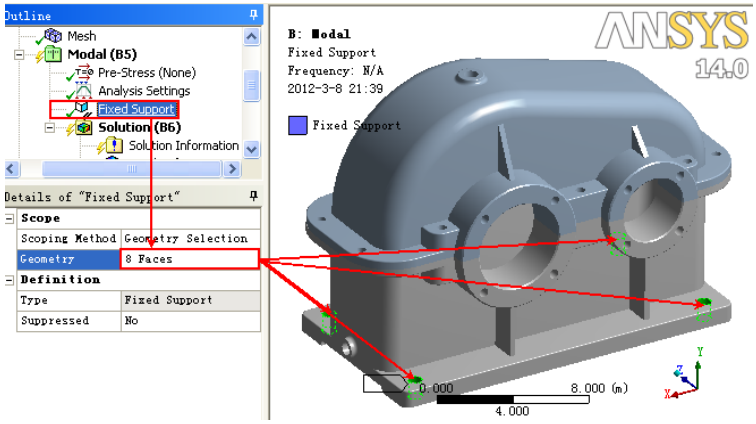


图 4-38　约束

6. 模态求解

右击 Modal（B5）选项，此时弹出一个快捷菜单，如图 4-39 所示，在快捷菜单中选择 Solve 命令，进行模态分析，此时默认的阶数为 6 阶。

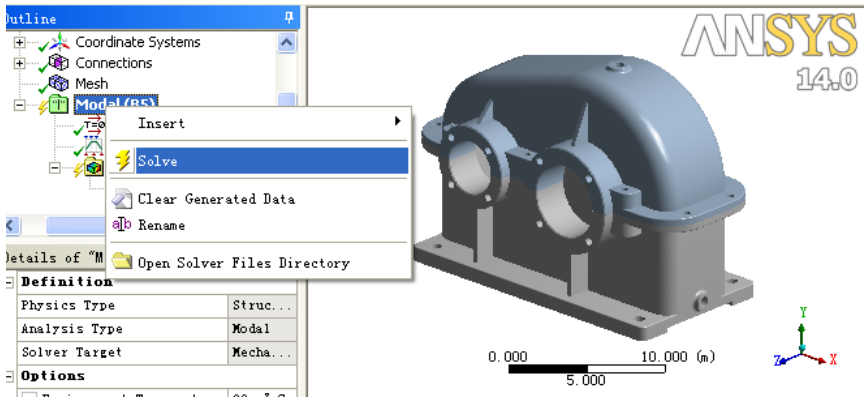


图 4-39　Solve 命令

7. 后处理

Step1：右击 Solution 选项，如图 4-40 所示，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Deformation→Total 命令。

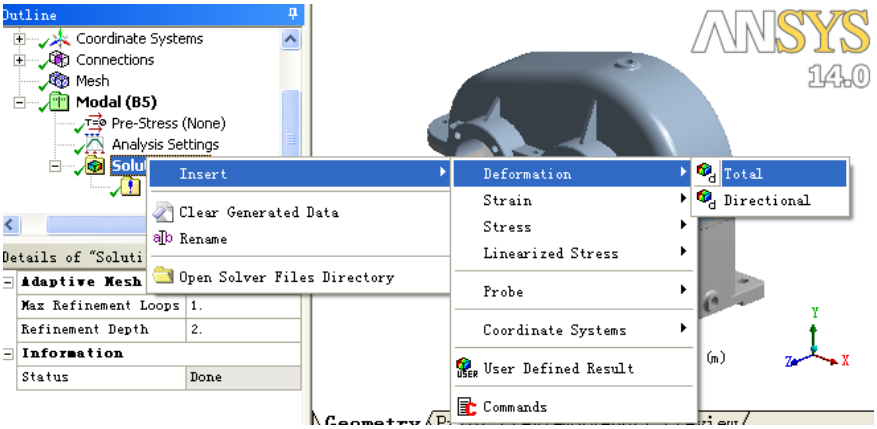


图 4-40　添加变形选项

Step2：如图 4-41 所示，右击 Solution（B6）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令。

Step3：计算完成后，选择 Total Deformation 选项，如图 4-42 所示，此时在图形操作区显示位移响应云图，在下面的 Details of “Total Deformation”面板中的 Mode 栏的数值为 1，表示是第一阶模态的位移响应。

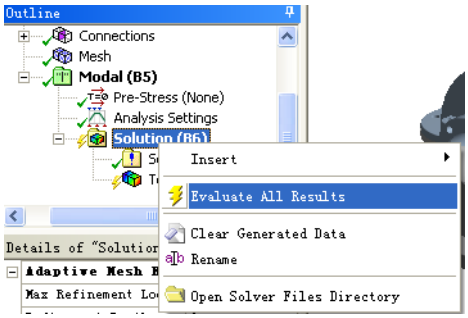


图 4-41　计算位移

Step4：单击按钮关闭 Mechanical 界面。

8. 创建响应谱分析项目

Step1：如图 4-43 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Harmonic Response（谐响应分析）选项直接拖曳到项目 B（模态分析）的 B6Solution 中。

Step2：如图 4-44 所示，此时，项目 B 的所有前处理数据已经全部导入项目 C 中，此时如果双击项目 C 中的 C5Setup 选项即可直接进入 Mechanical 界面。

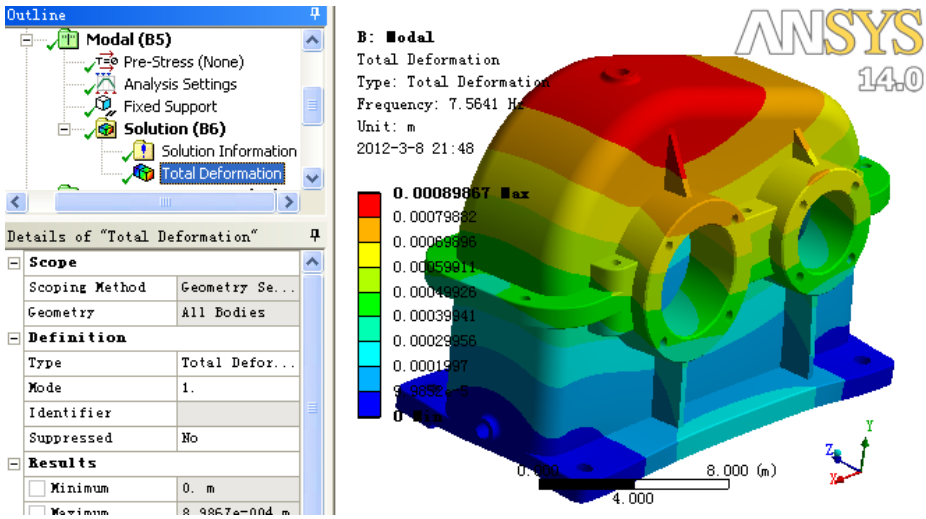


图 4-42　计算位移

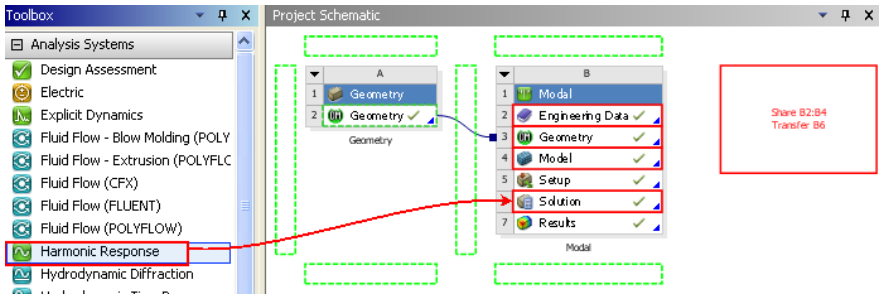


图 4-43　创建谐响应分析

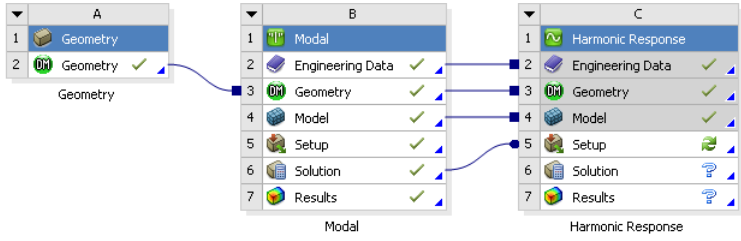


图 4-44　工程数据共享

9. 施加载荷与约束

Step1：双击主界面项目管理区项目 C 中的 C5 栏 Setup 选项，进入如图 4-45 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

Step2：如图 4-46 所示，在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step3：如图 4-47 所示，在 Outlines（分析树）中的 Harmonic Response（C5）→Analysis

Settings 选项单击，在下面出现的 Details of “Analysis Settings”选项的 Options 中做如下更改。

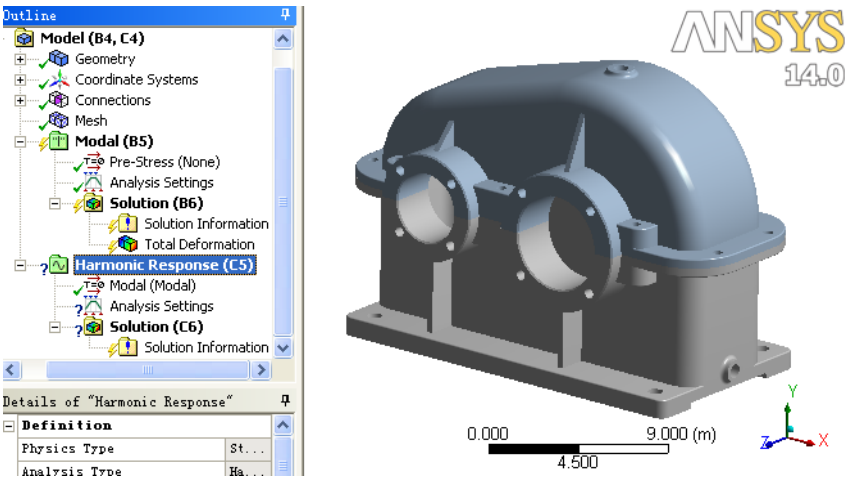


图 4-45　Mechanical 界面

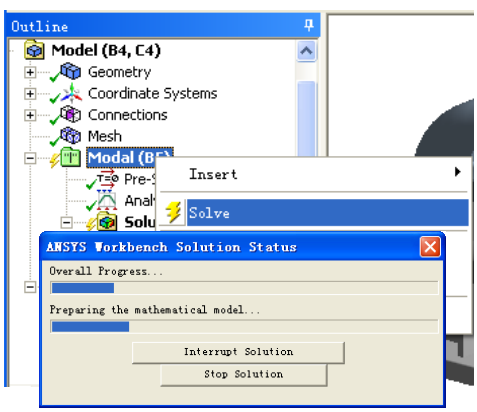


图 4-46　模态计算

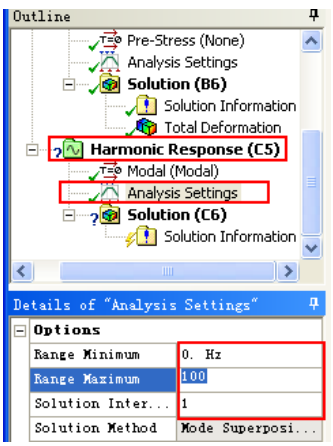


图 4-47　频率设定

在 Range Minimum 中输入 0Hz，在 Range Maximum 中输入 100Hz，在 Solution Interval 中输入 1。

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Harmonic Response（C5）选项，如图 4-48 所示，选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Moment（力矩）命令，此时在分析树中会出现 Moment 选项。

Step5：如图 4-49 所示，选择 Moment 选项，默认也将计算机箱选中，在 Details of “Moment”中 Scope→Geometry 栏中选择大齿轮位置内侧面，在 Magnitude 栏中输入 500N • m，完成力矩的设置。

Step6：如图 4-50 所示，同样方式设置另一个轴承的大小，其值为 300N • m，方向与上一步相反，完成力矩的设置。

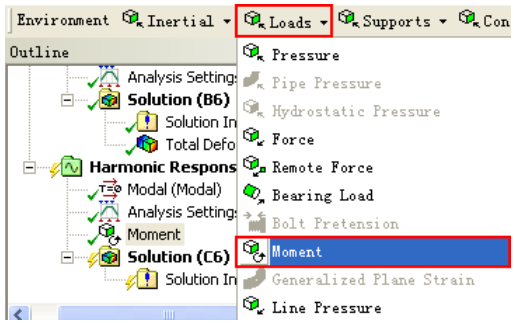


图 4-48　施加惯性力

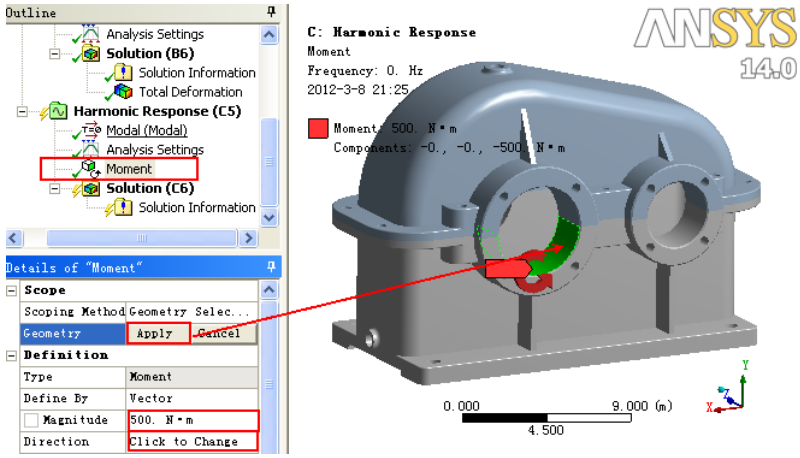


图 4-49　数值设定

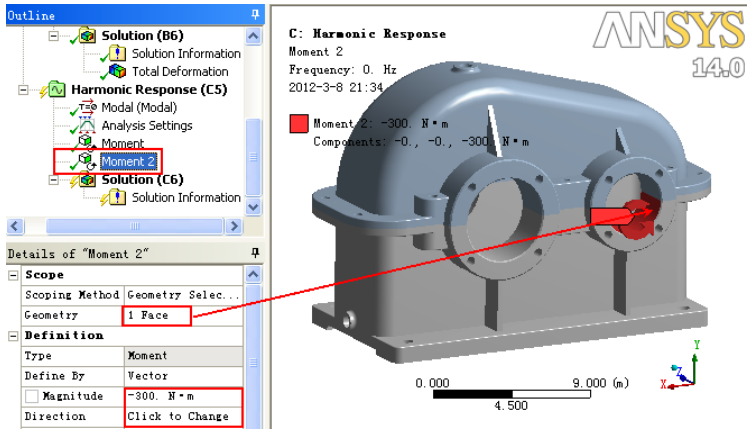


图 4-50　数值设定

10. 谐响应计算

如图 4-51 所示，右击 Harmonic Response(C5)选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

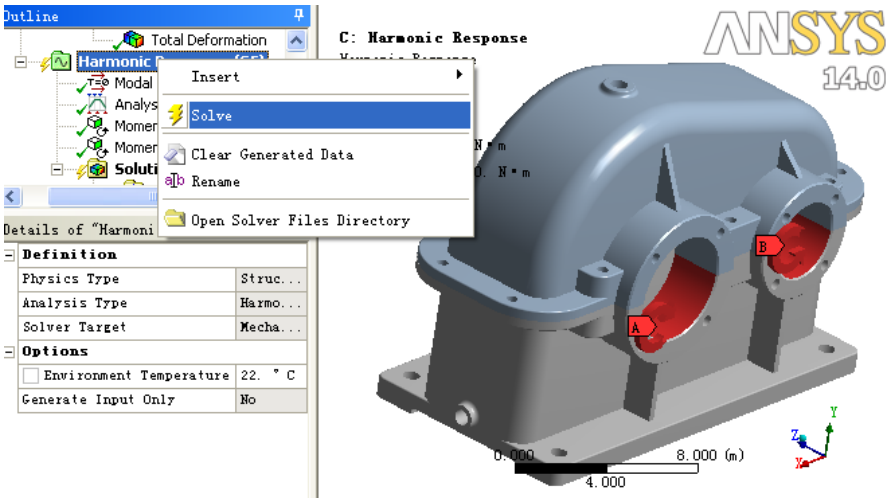


图 4-51　求解

11. 结果后处理

Step1：在 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Deformation→Total 命令，如图 4-52 所示，在后处理器中添加位移响应命令。

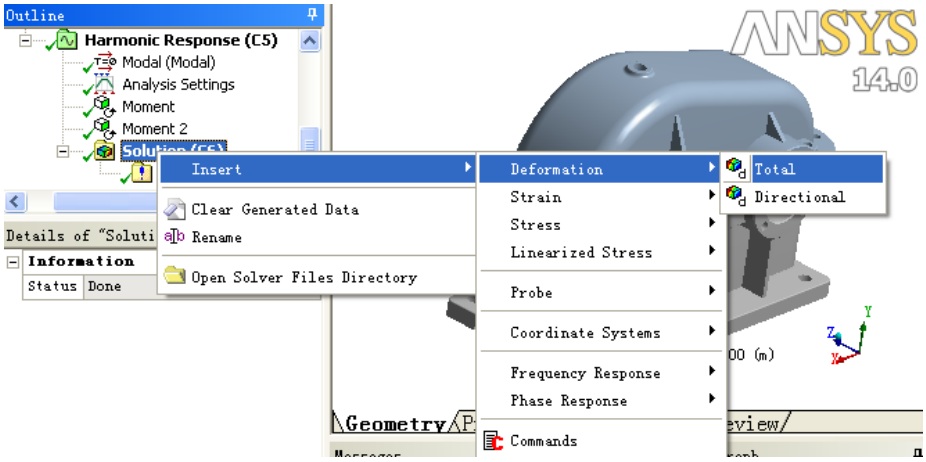


图 4-52　添加位移响应

Step2：如图 4-53 所示为位移响应云图。

Step3：如图 4-54 所示，选择节点，然后在 Solution 工具栏中选择 Frequency Response →Deformation 命令，此时，在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

Step4：右击 Solution 工具栏中的 Frequency Response 选项，在弹出来的如图 4-55 所示的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令。

Step5：选择 Outline（分析树）中 Solution（C6）下的 Frequency Response 选项，此时会出现如图 4-56 所示的节点随频率变化的曲线。

Step6：如图 4-57 所示为齿轮箱各阶响应频率及相角。

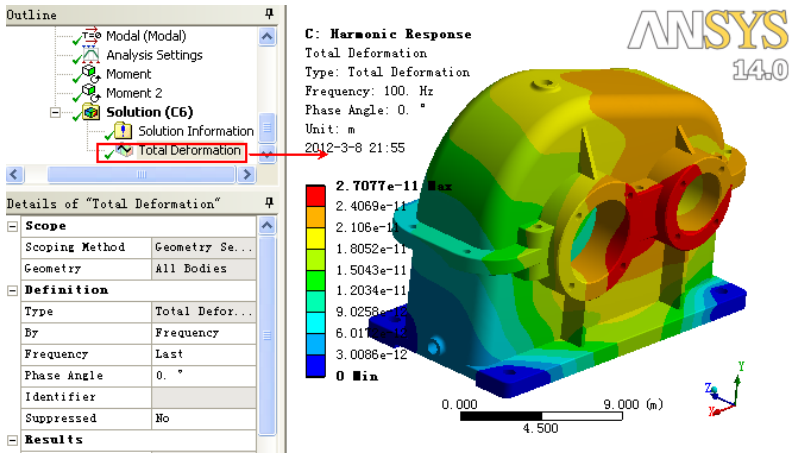


图 4-53　位移响应

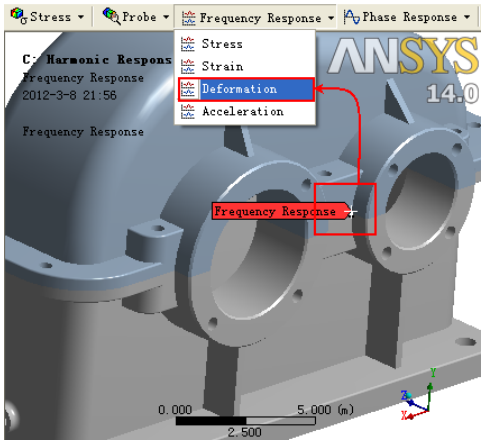


图 4-54　添加变形选项

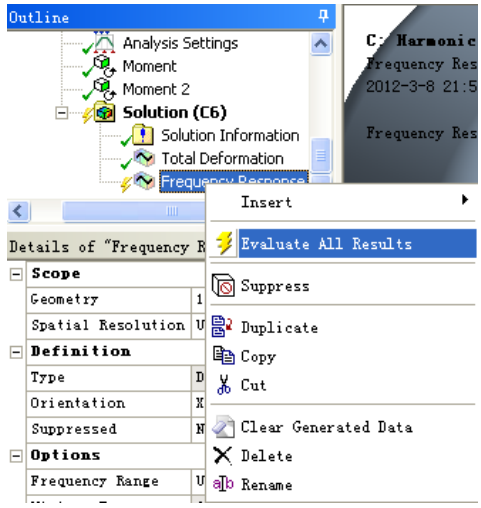


图 4-55　计算位移

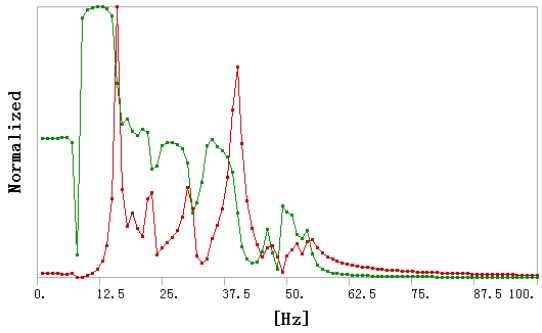


图 4-56　变化曲线

	Frequency [Hz]	Amplitude [m]	Phase Angle
1	1.	9.478e-011	0.13072
2	2.	9.3031e-011	0.277
3	3.	9.0072e-011	0.45557
4	4.	8.5888e-011	0.68112
5	5.	8.0698e-011	0.93448
6	6.	7.6009e-011	0.89231
7	7.	8.6265e-011	-4.4729
8	8.	2.2565e-011	-150.19
9	9.	1.5022e-011	156.01
10	10.	4.5044e-011	165.63
11	11.	9.6112e-011	169.04
12	12.	1.7901e-010	169.94
13	13.	3.24e-010	169.38
14	14.	6.2377e-010	166.83
15	15.	1.5287e-009	157.57
16	16.	5.2143e-009	71.893
17	17.	1.7095e-009	19.213
18	18.	9.9983e-010	24.576
19	19.	1.2529e-009	9.8403
20	20.	9.6347e-010	3.9574

图 4-57　各阶响应频率及相角

12. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 4-58 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存为 chilunxiang_modal 文件名。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

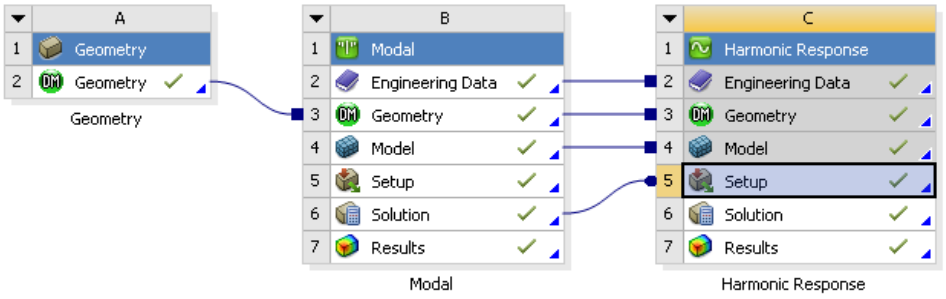


图 4-58　项目管理区中的分析项目

4.4 项目案例 3——丝杆谐响应分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的响应谱分析模块，计算丝杆的谐响应分析。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 谐响应分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ sigan.x_t
结果文件	光盘\example\ sigan.x_t.wbpj

1. 问题描述

电机通过联轴器链接丝杆将旋转运动改变为直线运动，如图 4-59 所示。丝杆不断地旋转会产生一个周期性的力，此变载荷的存在使丝杆的变形和应力等状态都与静载荷大不相同，因此很有分析的必要。



图 4-59　丝杆

2. 添加材料和导入模型

Step1：在主界面中建立分析项目，项目为谐响应分析（Harmonic Response）。双击分析系统中 Harmonic Response 选项，生成谐响应分析项目，如图 4-60 所示。

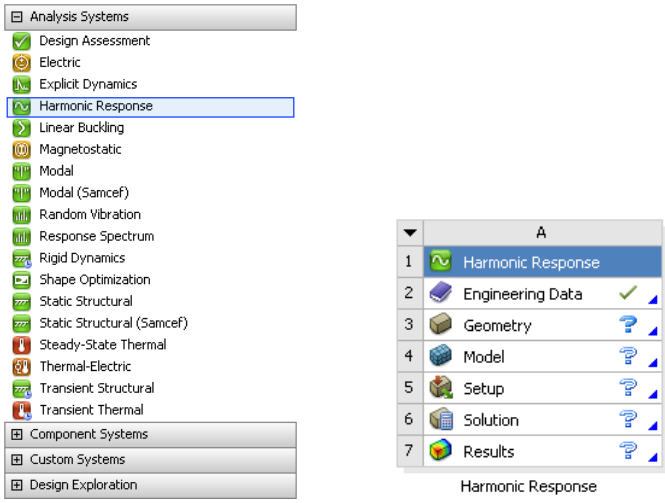


图 4-60　谐响应分析项目



图 4-61　更改分析项目名称

Step2：双击 A 项目下部 Harmonic Response 选项，将分析项目名更改为“丝杆谐响应”，如图 4-61 所示。

Step3：双击 A2 栏 Engineering Data 选项进入材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

Step4：在界面的空白处右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令。原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

Step5：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A11 栏 Stainless Steel（不锈钢）后的 B11 栏的（添加）按钮，此时在 C11 栏中会显示（使用中的）标识，材料添加成功。

Step6：同 Step3，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step7：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

Step8：在 A3 栏的 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，在弹出的对话框中选择需要导入的模型 sigan.x_t，如图 4-62 所示。这时候可以发现拉杆模态分析项目中的 Model（A3）后面的变成了，说明丝杆模型数据已经传入到谐响应分析项目中。

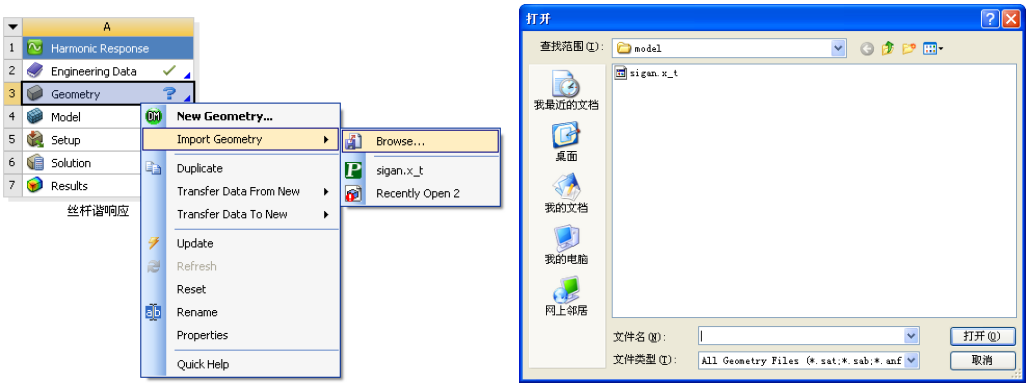


图 4-62　导入模型图

3. 赋予材料和划分网格

Step1：双击丝杆谐响应分析项目中 A4 栏 Model 选项，打开 Mechanical 界面。

Step2：单击 Outline 栏 Geometry 项前部的 ⊞ 按钮，选择 solid 选项，如图 4-63 所示。

Step3：单击 Details of “Multiple Selection”栏中 Assignment 项后 ▸ 按钮，如图 4-64 所示。选择 Stainless Steel。

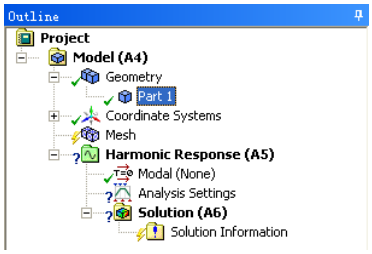


图 4-63　选择 solid

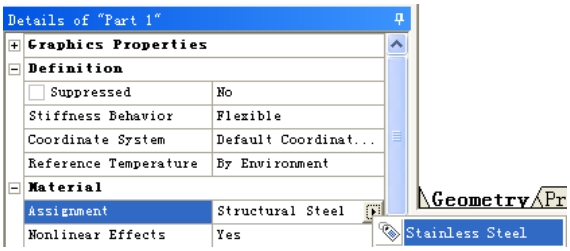


图 4-64　更改材料

Step4：选择 Outline 栏中的 Mesh 选项，此时会出现网格参数设置列表，选择 Details of “Mesh”选项，单击 Sizing 前的 ⊞ 按钮，在 Element Size 中输入 3，如图 4-65 所示。

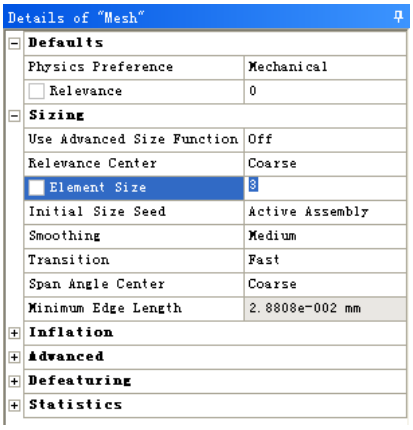


图 4-65　设置网格大小

Step5：在 Outline 栏目中 Mesh 选项上右击，选择 Generate Mesh 命令，划分网格，如图 4-66 所示。划分后网格如图 4-67 所示。

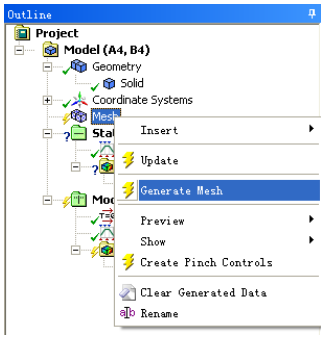


图 4-66　网格划分



图 4-67　网格

4. 添加约束和载荷

Step1：选择 Outline 栏中 Harmonic Response（A5）选项，如图 4-68 所示，此时会出现如图 4-69 所示的 Environment（环境）工具栏。

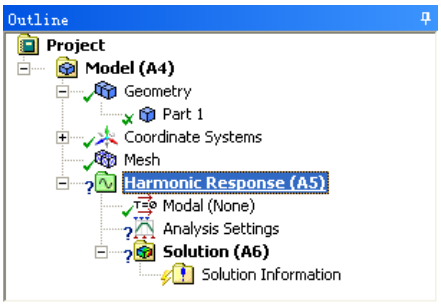


图 4-68　边界条件选项



图 4-69　环境工具栏

Step2：选择 Environment（环境）工具栏中的 Supports 菜单，在下拉菜单中选择 Fixed Support 命令，如图 4-70 所示。

Step3：按住 Ctrl 键，选择丝杆的两个端面，如图 4-71 所示。在 Details of “Fixed Support”栏中，单击 Geomtry 中的 Apply 按钮，如图 4-72 所示。

Step4：选择 Environment（环境）工具栏中 Supports 菜单，选择 Bearing Load（轴承载荷）命令，如图 4-73 所示。

Step5：选择丝杆两端的圆柱面，如图 4-74 所示。在 Details of “Bearing Load”栏中，在 Define By 中选择 Components 选项，如图 4-75 所示。确保在 Geomtry 中丝杆的两端圆柱面被选中，并在 X Component 中输入 1500，如图 4-76 所示。

Step6：选择 Outline 栏的 Analysis Setting 选项，如图 4-77 所示。此时会出现 Details of “Analysis Settings”栏，在 Range Maximum 项中输入 1000，如图 4-78 所示。

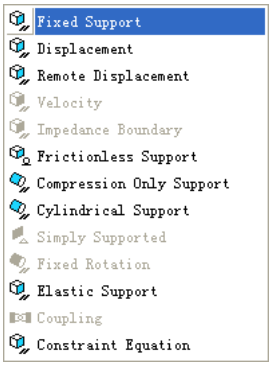


图 4-70　选择固定约束

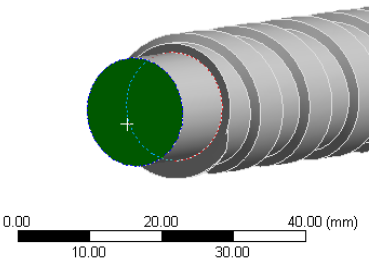


图 4-71　选择约束面

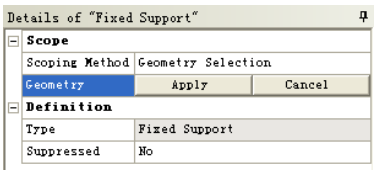


图 4-72　确认约束

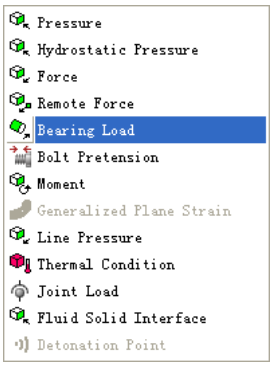


图 4-73　选择轴承载荷

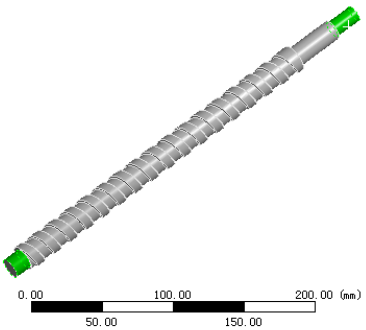


图 4-74　选择加载位置

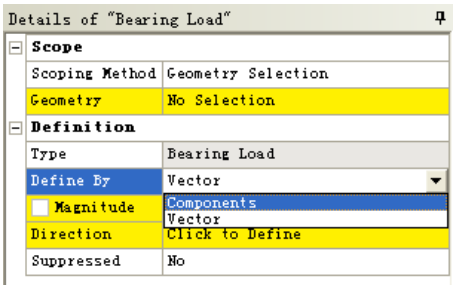


图 4-75　选择载荷方向

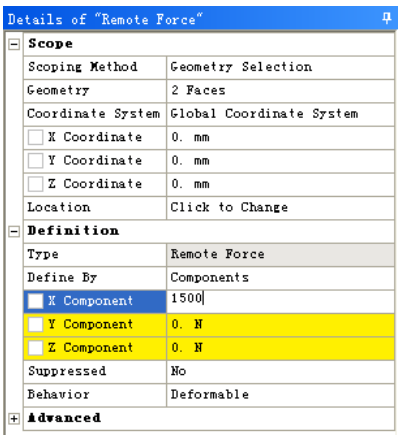


图 4-76　力载荷参数设置

5. 谐响应求解

在 Outline 栏中 Solution（A6）选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 4-79 所示。求解时会出现进度栏。当进度栏消失，同时 Solution（A6）选项前方出现 ✓ 标识，说明静态结构求解已经结束，如图 4-80 所示。

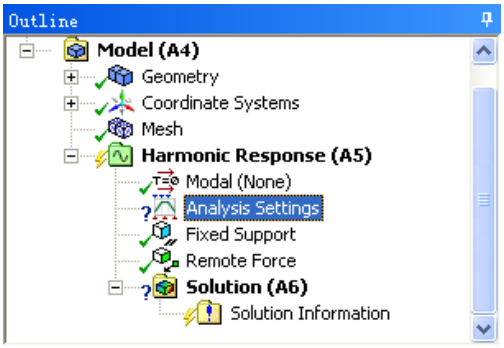


图 4-77　选择分析设置

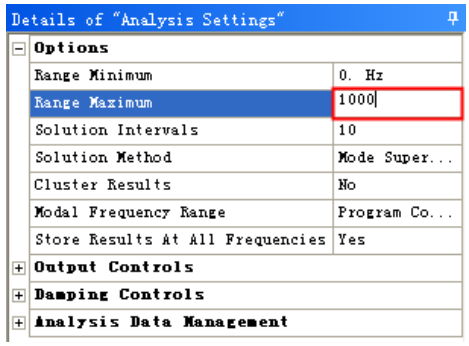


图 4-78　输入最大频率

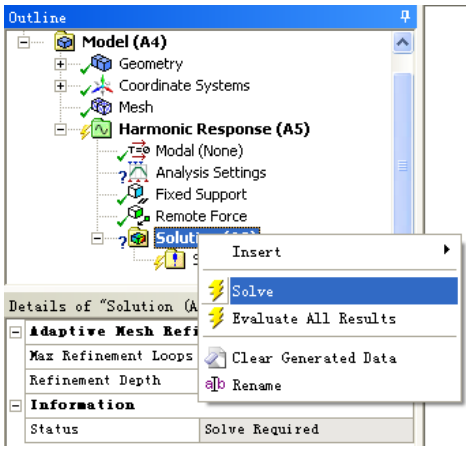


图 4-79　求解

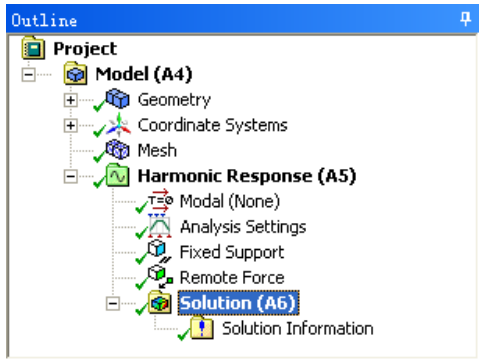


图 4-80　谐响应求解完成

6. 谐响应后处理

Step1：在 Solution 工具栏中单击 Freguency Response 按钮，如图 4-81 所示，选择 Deformation 命令，如图 4-82 所示，此时会出现 Details of "Frequency Response"栏，如图 4-83 所示。选择需要显示变形的面，如丝杆的螺纹面，如图 4-84 所示，单击 Apply 按钮确定。在 Outline 栏的 Frequency Response 选项上右击，选择 Evaluate All Results 命令，如图 4-85 所示。此时会出现变形频响函数曲线，如图 4-86 所示。



图 4-81　Solution 工具栏

Step2：在 Outline 栏中的 Solution（A6）选项上右击，在出现的快捷菜单中依次选择 Insert→Deformation→Total 命令，添加变形分析结果，如图 4-87 所示。

Step3：在 Outline 栏中的 Solution（A6）选项上右击，在出现的快捷菜单中依次选择 Insert→Stress→Equivalent 命令，添加应力结果，如图 4-88 所示。

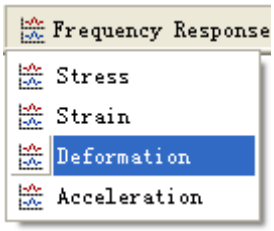


图 4-82　选择变形频响曲线

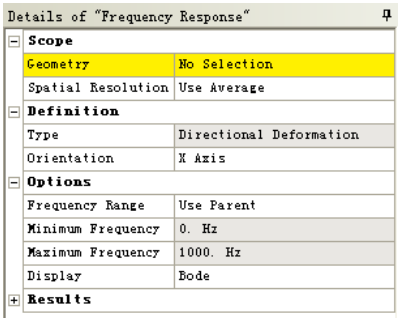


图 4-83　Details of "Frequency Response"栏

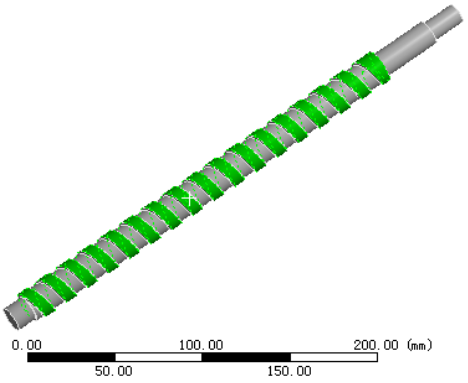


图 4-84　选择螺纹面

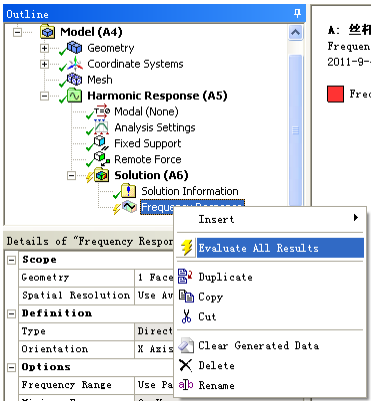


图 4-85　提取结果

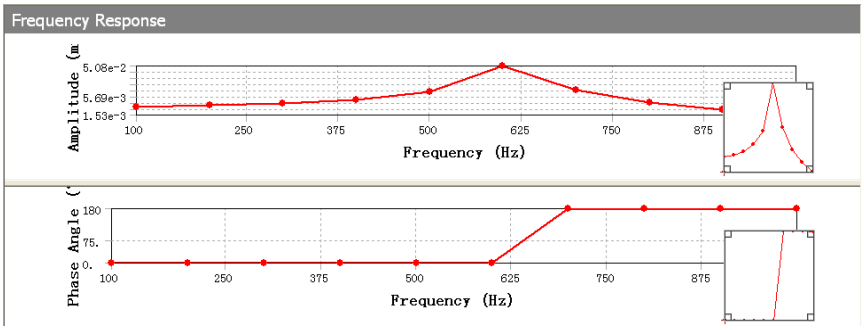


图 4-86　变形频响函数曲线

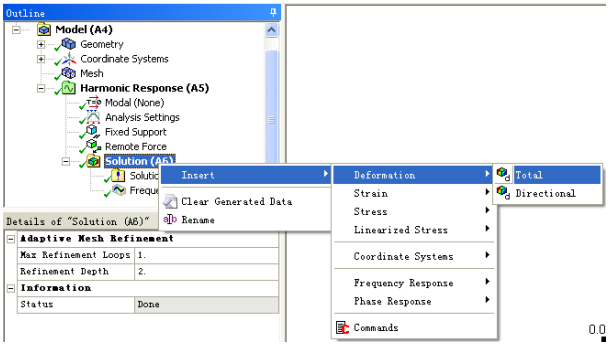


图 4-87　添加变形结果

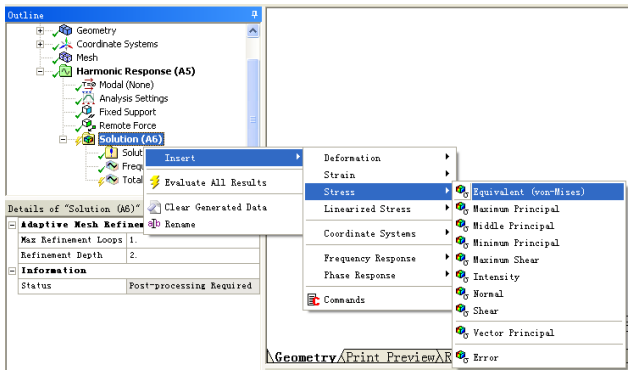


图 4-88　添加应力结果

Step4：选择 Outline 栏中的 Total Deformation 选项，如图 4-89 所示。此时会出现 Details of “Total Deformation”栏，在 Frequency 中输入 600，如图 4-90 所示。

Step5：选择 Outline 栏中的 Equivalent Stress 选项，如图 4-91 所示。此时会出现 Details of “Equivalent Stress”栏，在 Frequency 中输入 600。

Step6：在 Outline 栏，Solution（A6）选项上右击，选择 Evaluate All Results 命令，如图 4-92 所示。

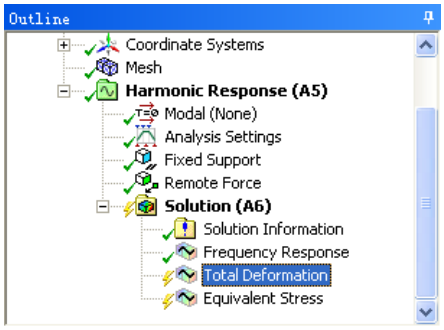


图 4-89　选择变形结果

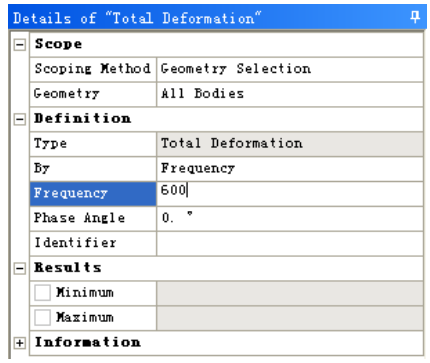


图 4-90　输入频率

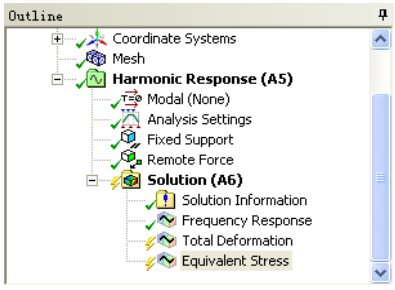


图 4-91　选择应力结果

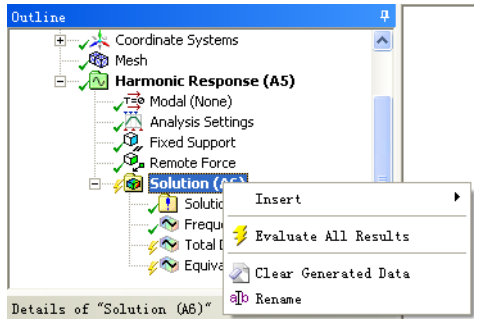


图 4-92　显示结果

Step7：在 Outline 栏中“Solution（A6）”中 Total Deformation 选项上单击，显示变形结果，如图 4-93 所示。

Step8：在 Outline 栏中“Solution（A6）”中 Equivalent Stress 选项上单击，显示应力结果，如图 4-94 所示。

有兴趣的读者可以如 Step4 中操作，输入不同的频率来求解，并对比它们的不同之处。

7. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的按钮，退出 Mechanical 返回 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 4-95 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save 按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击主界面右上角的按钮，退出 Workbench，完成项目分析。

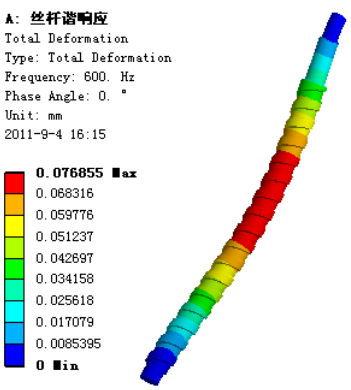


图 4-93　变形结果

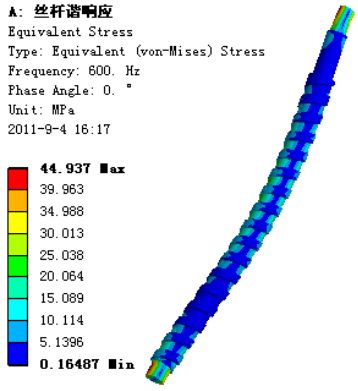


图 4-94　应力结果

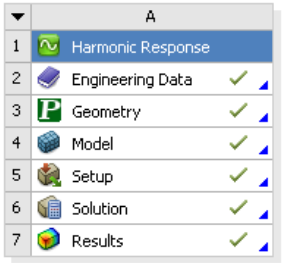


图 4-95　项目分析完成

4.5 本章小结

本章节用了两个典型案例详细介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件的谐响应分析模块，包括谐响应分析的建模方法、网格剖分、边界条件的施加，同时还详细介绍了含有接触的谐响应分析的分析方法及操作步骤。

通过本章节的学习，读者应该对谐响应分析的过程有详细的了解，同时能够对关键节点的频响曲线进行绘制。

第 5 章

响应谱分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的响应谱分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对响应谱分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件响应谱分析的过程。

（2）了解响应谱分析与结构静力学分析的不同之处。

（3）了解响应谱分析的应用场合。

5.1 响应谱分析简介

响应谱分析是一种频域分析，其输入载荷为振动载荷的频谱，如地震响应谱，常用的频谱为加速度谱，也可以用速度谱和位移谱等。响应谱分析从频域的角度计算结构的峰值响应。

载荷频谱被定义为响应幅值与频率的关系，响应谱分析计算结构各阶振型在给定载荷频谱下的最大响应，这一最大响应是响应系数和振型的乘积，这些振型最大响应组合在一起就给出了结构的总体响应。因此，响应谱分析需要首先计算结构的固有频率和振型，必须在模态分析之后进行。

响应谱分析的类型分为单点响应谱和多点响应谱。

（1）单点响应谱，即作用在所有被固定的节点上的单一响应谱。

（2）多点响应谱，即不同被固定节点上作用有不同的响应谱。

响应谱分析一般应用在需要进行地震分析的建筑物、核反应塔等，同时空中电子设备所受到的震动等也需要响应谱分析。

在进行响应谱分析时，常涉及到以下几个概念。

（1）参与因子：用于衡量模态振型在激励方向上对变形的影响程度（进而影响应力），参与因子是振型和激励方向的函数，对于结构的每一阶模态 i，程序需要计算该模态在激励方向上的参与因子 γ_i。参与因子的计算式为

$$\boldsymbol{\gamma}_i = \{\boldsymbol{x}\}_i^T[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{D}\} \tag{5-1}$$

式中，$\boldsymbol{x}_i$ 为第 i 阶模态按照 $\{\boldsymbol{x}_i\}^T[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}_i\}=1$ 式归一化的振型位移向量；$[\boldsymbol{M}]$ 为质量矩阵；$\{\boldsymbol{D}\}$ 为描述激励方向的向量。

（2）模态因子：与振型相乘的一个比例因子，从二者的乘积可以得到模态最大响应。

（3）模态有效质量：模态 i 的有效质量可以按下式进行计算，即

$$\boldsymbol{M}_{ei}=\frac{\boldsymbol{\gamma}_i^2}{\{\boldsymbol{x}_i\}^T[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}_i\}} \tag{5-2}$$

由于模态位移满足 $\{\boldsymbol{x}_i\}^T[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}_i\}=1$ 归一化条件，即

$$\boldsymbol{M}_{ei}=\boldsymbol{\gamma}_i^2 \tag{5-3}$$

（4）模态组合：给定每个模态在给定频谱下的最大响应后，将这些响应以某种方式进行组合就可以得到系统总响应。

ANSYS Workbench 14.0 提供了三种模态组合算法：SRSS、CQC 和 ROSE。而 SRSS 组合的结果通常比其他两个要保守些。

5.2 项目案例 1——塔架响应谱分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的响应谱分析模块，计算塔架在给定加速度频谱下的响应。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 响应谱分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ BeamResponseSpectrum.agdb
结果文件	光盘\example\ BeamResponseSpectrum.wbpj

1. 问题描述

如图 5-1 所示为某塔架模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算塔架在给定加速度频谱下的响应情况。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 5-2 所示。

3. 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 5-3 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 BeamResponseSpectrum.agdb 几何体文件，如图 5-4 所示，此时 A2Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

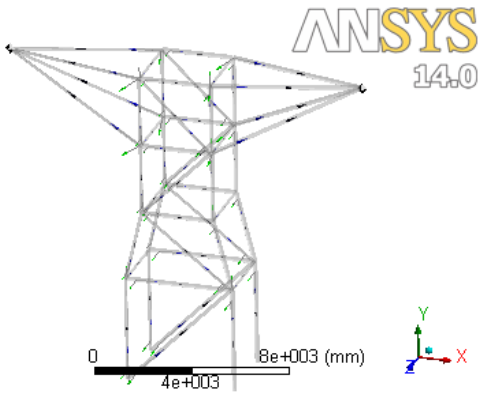


图 5-1　塔架模型

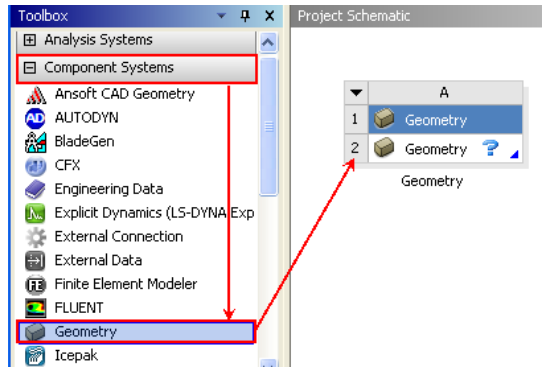


图 5-2　创建分析项目 A

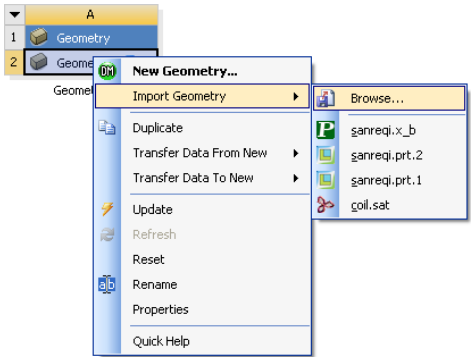


图 5-3　导入几何体

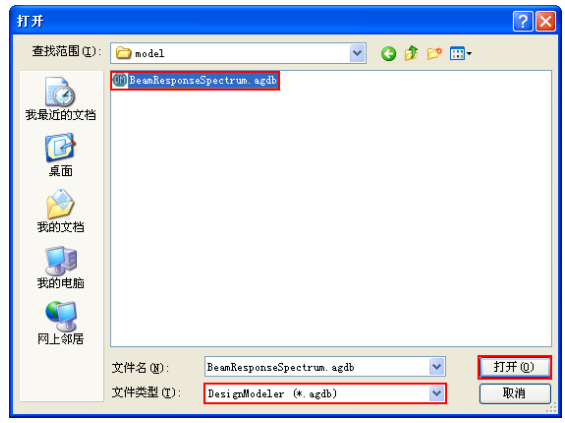


图 5-4　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry 选项，此时会进入到 DesignModeler 界面，在 DesignModeler 软件绘图区域会显示几何模型，如图 5-5 所示。

Step4：单击工具栏上的按钮保存文件，此时弹出如图 5-6 所示的“另存为”对话框，输入文件名为 BeamResponseSpectrum，单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面并单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

4. 模态分析

Step1：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Modal（模态分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 B（Modal），如图 5-7 所示。

Step2：如图 5-8 所示，选择项目 A 中的 A2（Geometry）选项直接拖曳到项目 B 中的 B3（Geometry）中，此时在 B3 栏中出现一个提示符 Share A2，此提示符表示 B3（Geometry）几何数据与 A2（Geometry）几何数据实现共享。

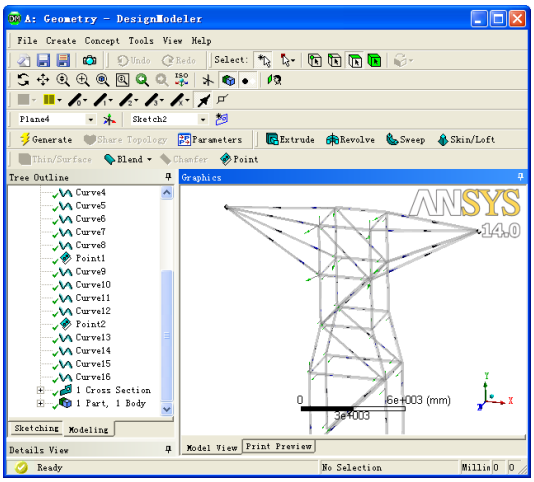


图 5-5　生成前的 DesignModeler 界面

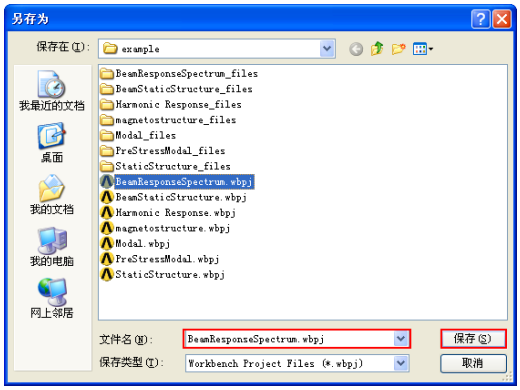


图 5-6　保存工程文件

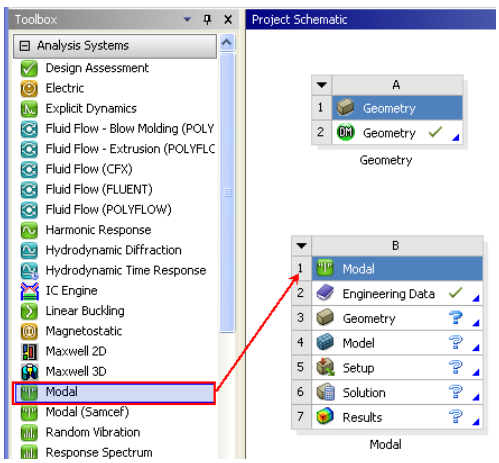


图 5-7　创建模态分析

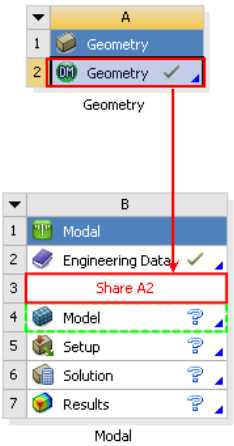


图 5-8　几何数据共享

5. 添加材料库

双击项目 B 中的 B2Engineering Data 选项，进入如图 5-9 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

注 意

本项目案例选择的材料为 Structural Steel(结构钢),磁材料为 ANSYS Workbench 14.0 默认被选中的材料，故此教程不需要设置。

6. 划分网格

Step1：双击项目 B 中的 B4（Model）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 5-10 所示。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在

Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，如图 5-11 所示在 Sizing 中的 Element Size 中输入 0.10m，其余采用默认设置。

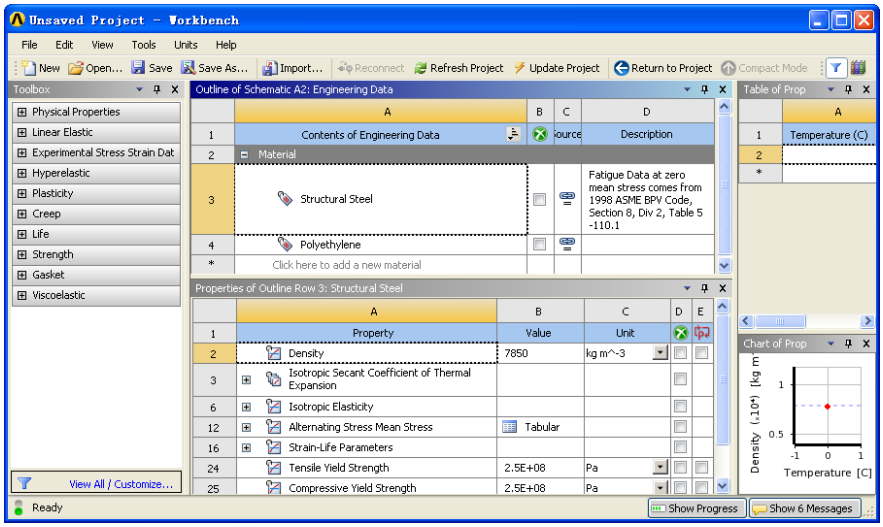


图 5-9　材料参数设置界面

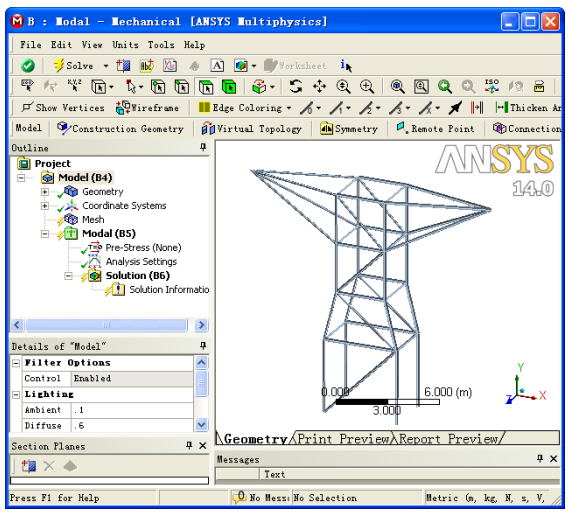


图 5-10　Mechanical 界面

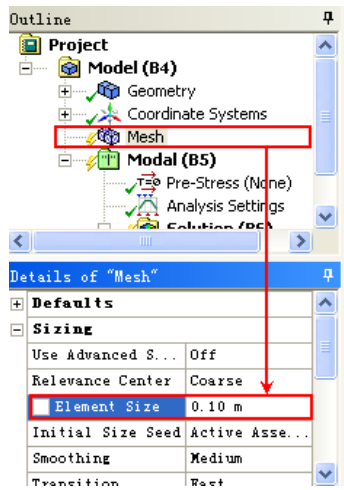


图 5-11　设置网格大小

Step3：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 5-12 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 5-13 所示。

7. 施加约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项，此时会出现如图 5-14 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）

命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 5-15 所示。

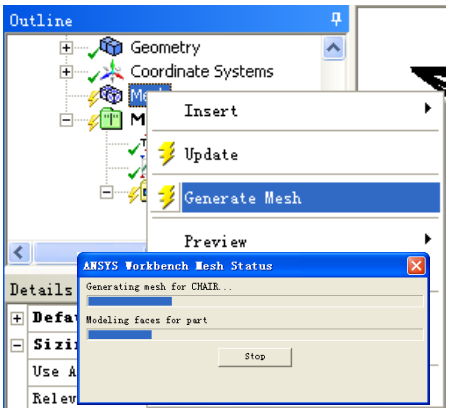


图 5-12　划分网格

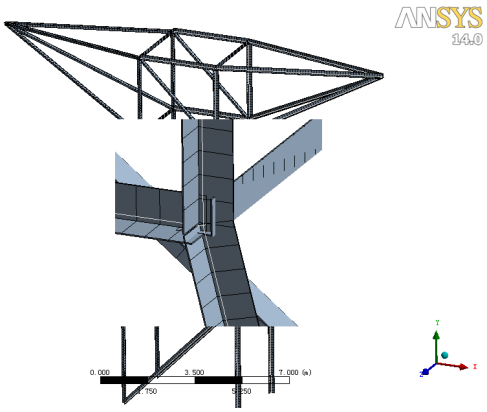


图 5-13　网格效果

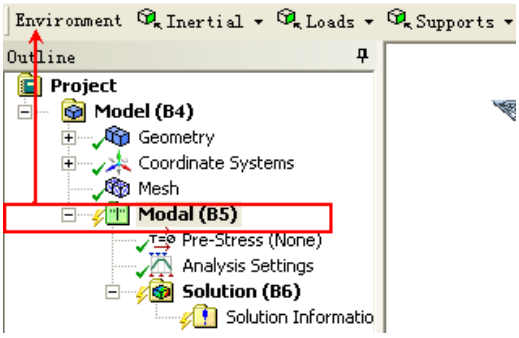


图 5-14　Environment 工具栏

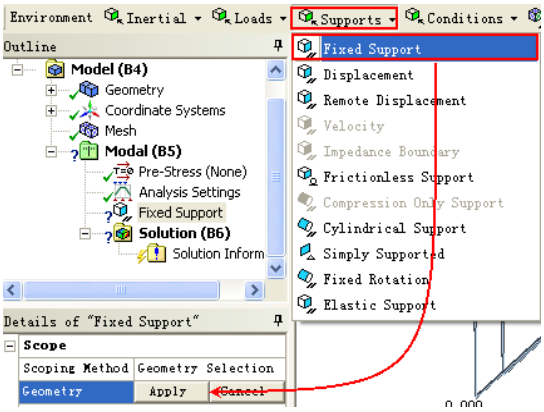


图 5-15　添加固定约束

Step3：单击工具栏中的（选择点）按钮，然后选择工具栏中的按钮中的，使其变成（框选择）按钮，选择 Fixed Support 选项，选择塔架的下端四个节点，单击 Details of “Fixed Support”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 5-16 所示。

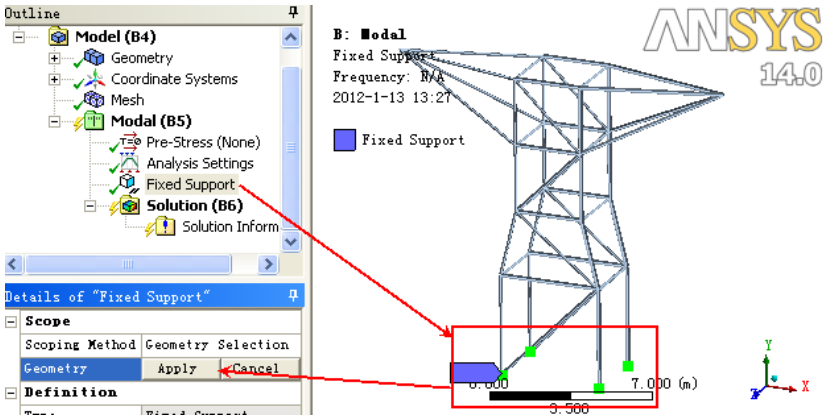


图 5-16　施加固定约束

Step4：在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 5-17 所示。

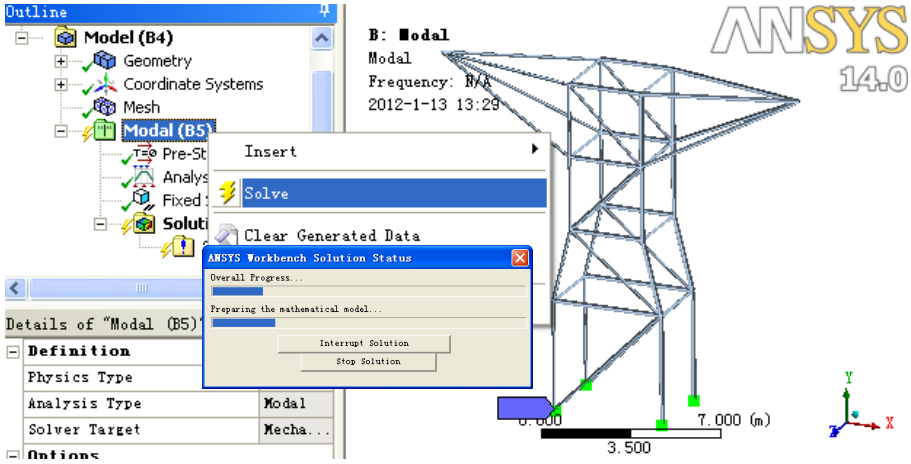


图 5-17　求解

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 5-18 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 5-19 所示，此时，在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

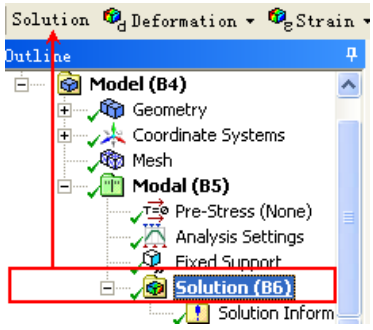


图 5-18　Solution 工具栏

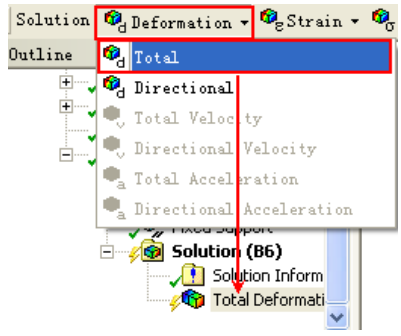


图 5-19　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 5-20 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 5-21 所示的一阶模态总变形分析云图。

Step5：图 5-22 所示为计算机机箱前六阶模态频率。

Step6：ANSYS Workbench 14.0 默认的模态阶数为六阶，选择 Outline（分析树）中 Modal（B5）下的 Analysis Settings（分析设置）选项，在下面如图 5-23 所示的 Details of

“Analysis Settings”下面的 Options 中有 Max Modes to Find 选项，在此选项中可以修改模态数量。

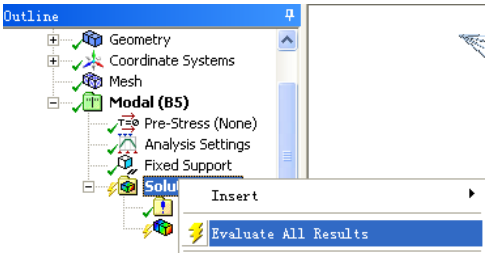


图 5-20　快捷菜单

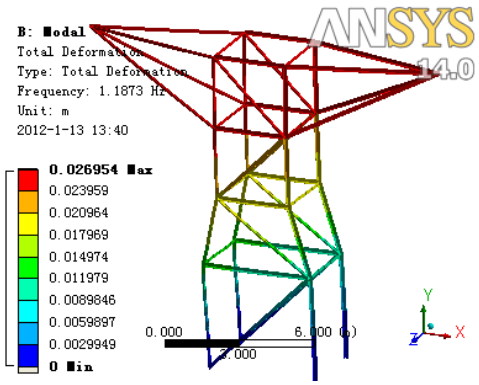


图 5-21　一阶变形

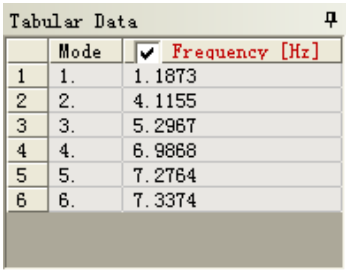


图 5-22　各阶模态频率

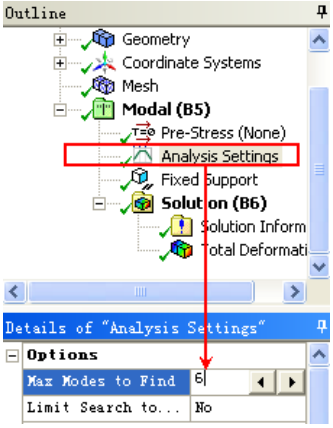


图 5-23　修改模态数量选项

Step7：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

9. 响应谱分析

Step1：回到 Workbench 主界面，如图 5-24 所示，选择 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Response Spectrum（响应谱分析）选项不放，直接拖曳到项目 B（Modal）的 B6 中。

Step2：如图 5-25 所示，在项目 B 与项目 C 直接实现了数据共享，此时在项目 C 中的 C5（Setup）会出现标识。

Step3：如图 5-26 所示，双击项目 C 的 C5（Setup）选项，进入 Mechanical 界面。

Step4：如图 5-27 所示，在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择Solve 命令。

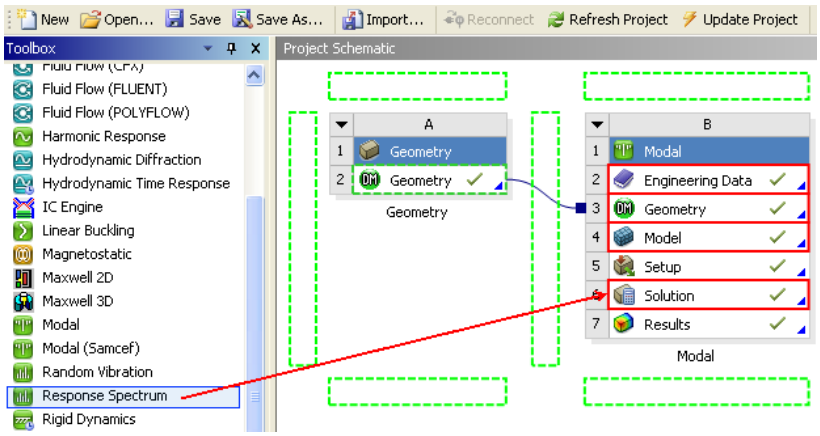


图 5-24　响应分析

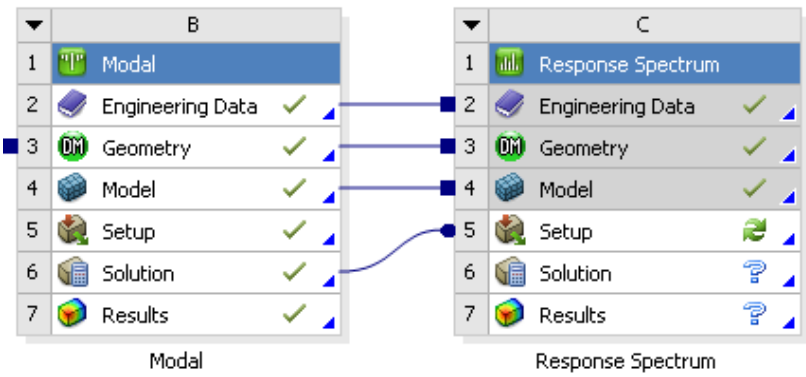


图 5-25　数据共享

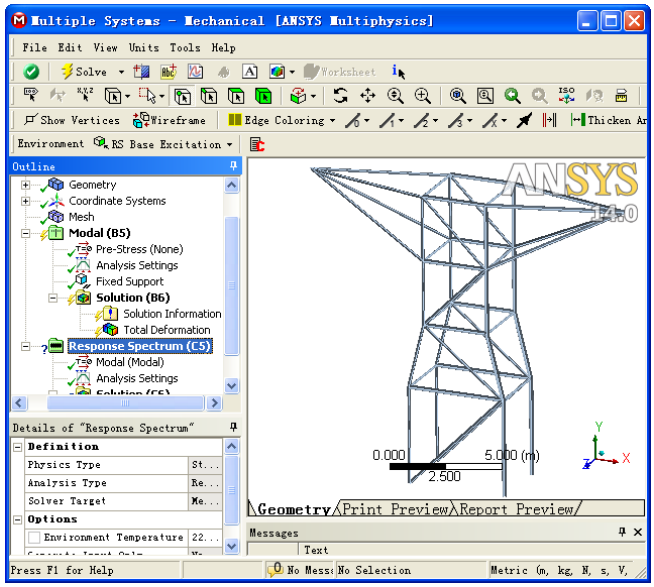


图 5-26　Mechanical 界面

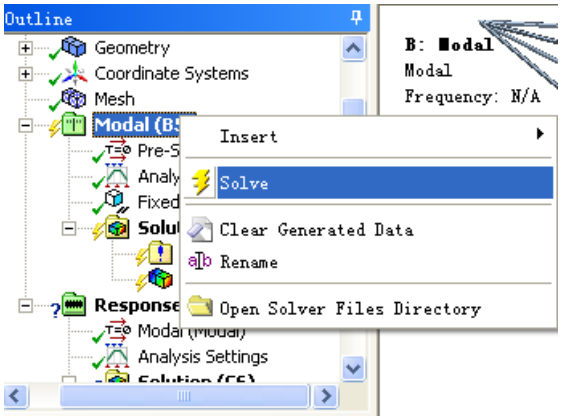


图 5-27　执行模态计算

10. 添加加速度谱

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Response Spectrum（C5）选项，此时会出现如图 5-28 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 RS Base Excitation（基础激励响应分析）→RS Acceleration（加速度谱激励）命令，如图 5-29 所示，此时在分析树中会出现 RS Acceleration 选项。

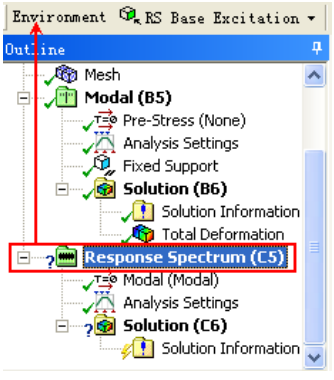


图 5-28　Environment 工具栏

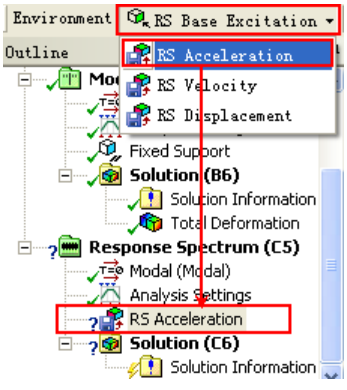


图 5-29　添加激励

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Response Spectrum（C5）→RS Acceleration（加速度谱激励）命令，在下面出现的如图 5-30 所示的 Details of “RS Acceleration”面板中做如下更改。

① 在 Scope→Boundary Condition 中选择 All BC Supports 选项。

② 在 Definition→Load Data 中选择 Tabular Data 选项，然后在右侧的 Tabular Data 表格中填入表 5-1 中的数据。

表 5-1　加速度值表

	Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]		Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]
1	0.897	1.95	6	4	4.32

续表

	Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]		Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]
2	1.01	2.16	7	5	4.05
3	1.08	2.31	8	6	3.85
4	1.98	3.98	9	7	3.46
5	2.25	4.41	10	8	3.02
	2.8	4.71		9	2.76
	3	5.2		10	2.34

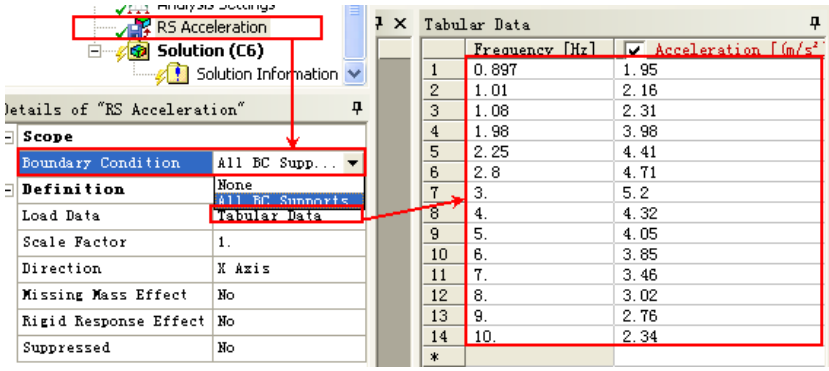


图 5-30　RS Acceleration 面板

Step4：在 Outline（分析树）中的 Response Spectrum（C5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 5-31 所示。

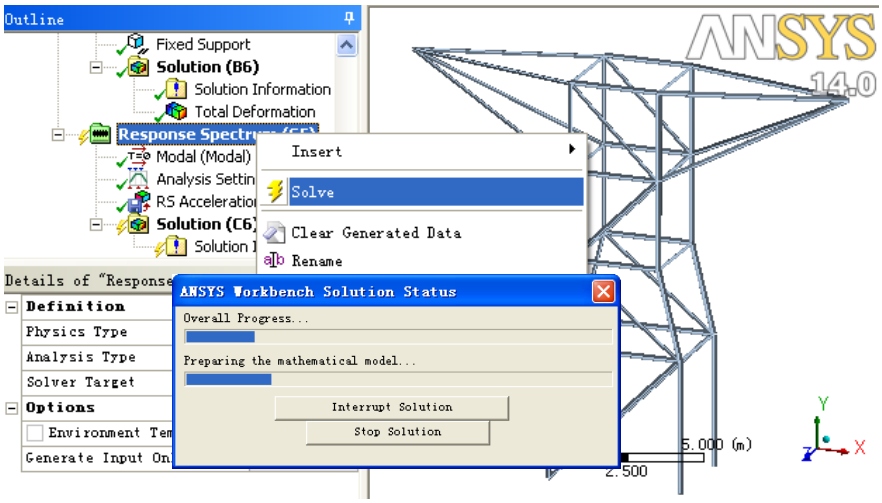


图 5-31　计算求解

11. 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项，此时

会出现如图 5-32 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Directional 命令，如图 5-33 所示，此时在分析树中会出现 Directional Deformation 选项。

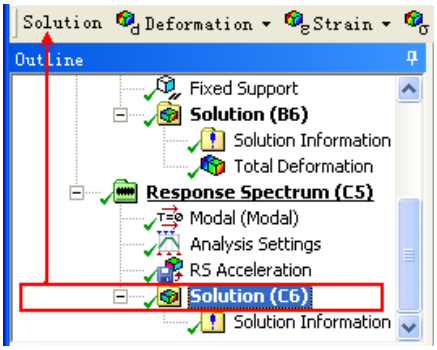


图 5-32　Solution 工具栏

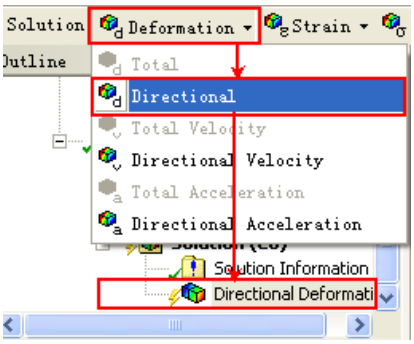


图 5-33　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 5-34 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（C6）下的 Directional Deformation 选项，此时会出现如 5-35 所示的变形分析云图。

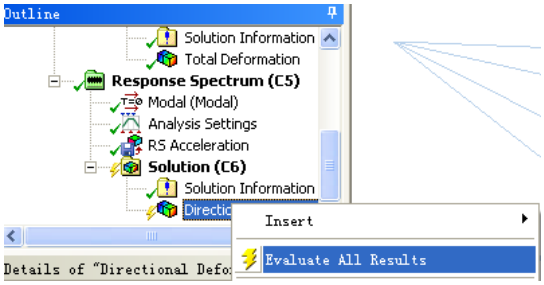


图 5-34　快捷菜单

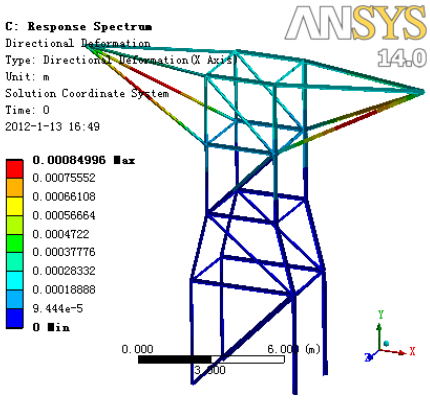


图 5-35　变形

12. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 5-36 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

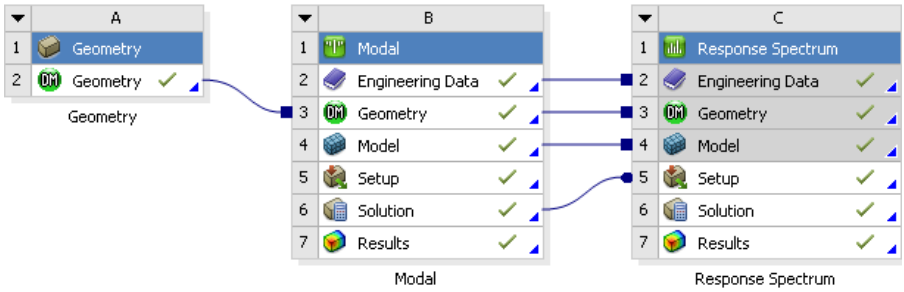


图 5-36　项目管理区中的分析项目

5.3　项目案例 2——计算机机箱响应谱分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的响应谱分析模块，计算机箱在受到 *Z* 方向简谐加速度激励时的响应情况。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 响应谱分析的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	光盘\example\ Computer_Spectrum.wbpj

1. 问题描述

如图 5-37 所示为某计算机机箱模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算计算机机箱受到 *Z* 方向简谐加速度激励时的响应情况，载荷幅值为 20g，频率为 10～150Hz，每 10Hz 为一个载荷频率点。

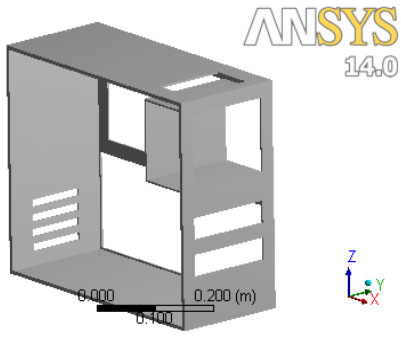


图 5-37　计算机机箱模型

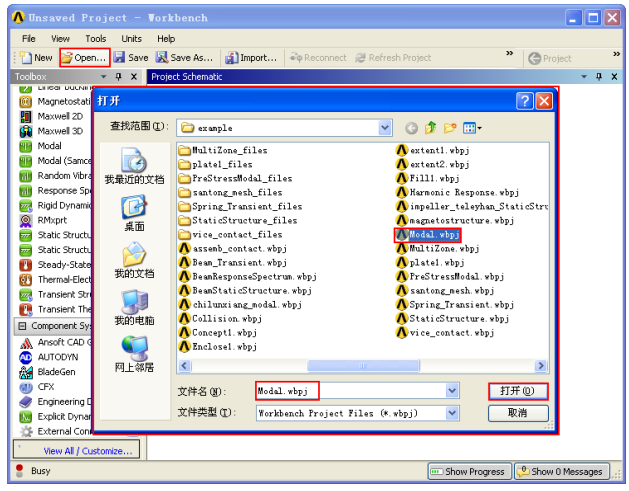


图 5-38　打开文件

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench

14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：单击工具栏中的 Open 按钮，在弹出的如图 5-38 所示的“打开”对话框中找到计算机机箱模态分析文件，即 Modal.wbpj 文件，单击“打开”按钮。

Step3：单击工具栏中的 Save As... 按钮，将文件另存为 Computer_Spectrum 文件名，单击“确定”按钮。

3. 响应谱分析

Step1：如图 5-39 所示，选择 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Response Spectrum（响应谱分析）选项不放，直接拖曳到项目 A（Modal）的 A6 中。

Step2：如图 5-40 所示，在项目 A 与项目 B 直接实现了数据共享，此时在项目 B 中的 B5（Setup）会出现 标示。

Step3：如图 5-41 所示，双击项目 B 的 B5（Setup）选项，进入 Mechanical 界面。

Step4：如图 5-42 所示，在 Outline（分析树）中的 Modal（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令。

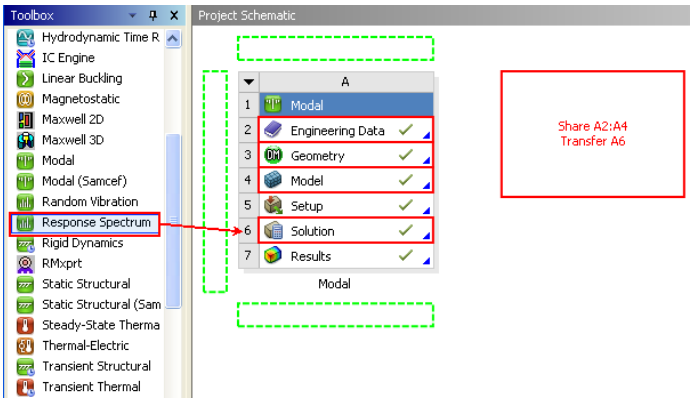


图 5-39　响应分析

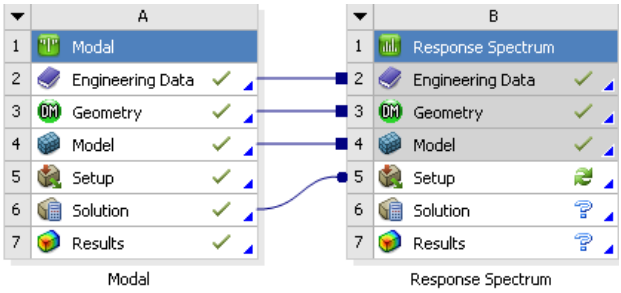


图 5-40　数据共享

4. 添加加速度谱

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Response Spectrum（B5）选项，此时会出现如图 5-43 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 RS Base Excitation（基础激励响应分析）→RS

Acceleration（加速度谱激励）命令，如图 5-44 所示，此时在分析树中会出现 RS Acceleration 选项。

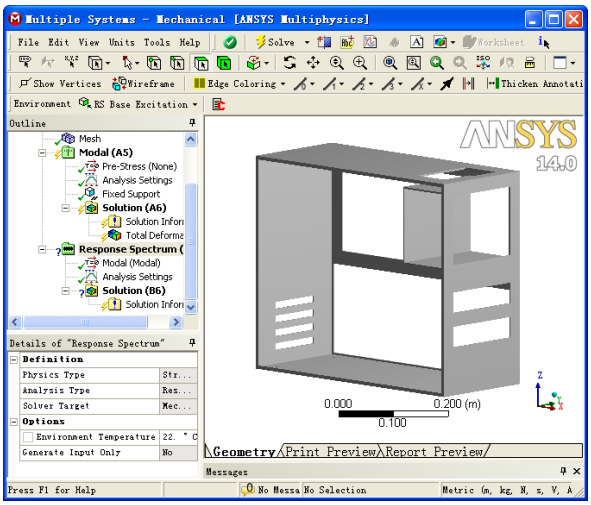


图 5-41　Mechanical 界面

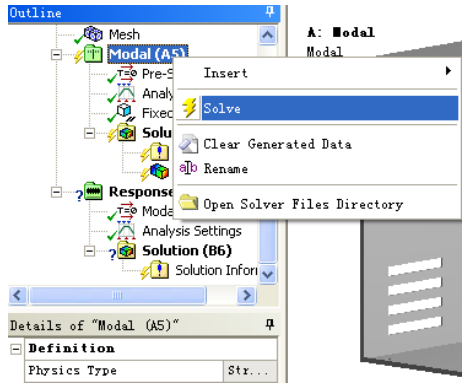


图 5-42　执行模态计算

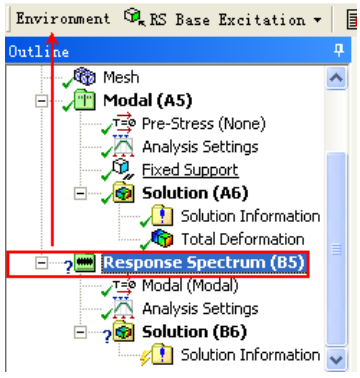


图 5-43　Environment 工具栏

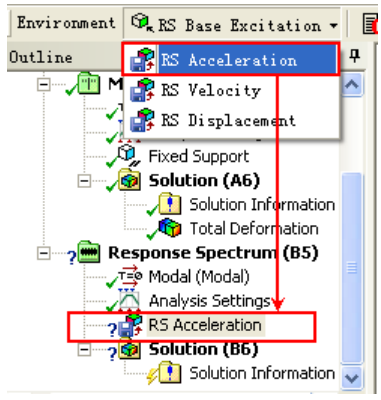


图 5-44　添加激励

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Response Spectrum（B5）→RS Acceleration（加速度谱激励）命令，在下面出现的如图 5-45 所示的 Details of “RS Acceleration”面板中做如下更改。

① 在 Scope→Boundary Condition 中选择 All BC Supports 选项。

② 在 Definition→Load Data 中选择 Tabular Data 选项，然后在右侧的 Tabular Data 表格中的频率列输入 10～150Hz，在 Acceleration[m/s^2]列输入 196.12 数据。

Step4：在 Outline（分析树）中的 Response Spectrum（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 5-46 所示。

5. 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项，此时

会出现如图 5-47 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Directional 命令，如图 5-48 所示，此时在分析树中会出现 Directional Deformation 选项。

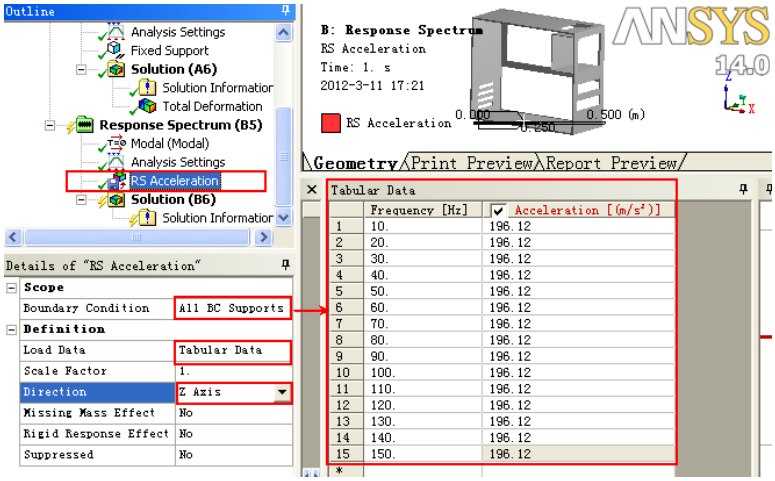


图 5-45　RS Acceleration 面板

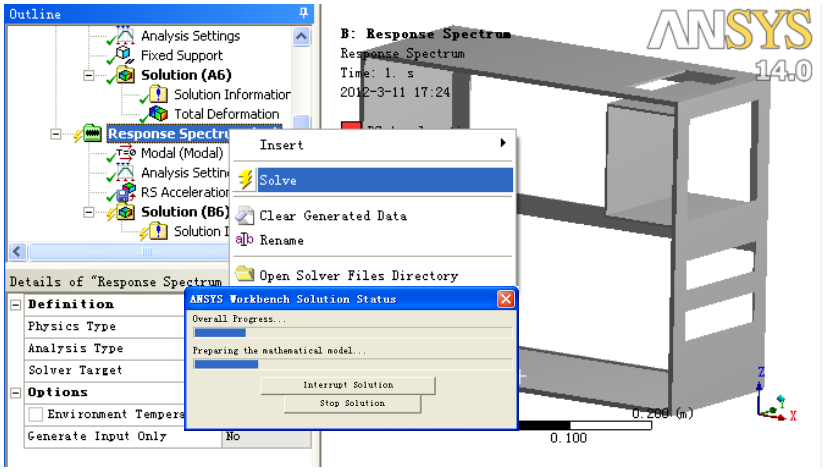


图 5-46　计算求解

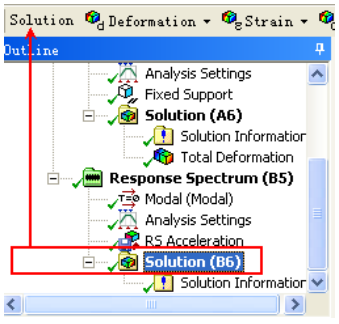


图 5-47　Solution 工具栏

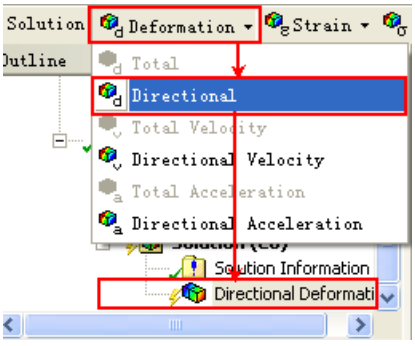


图 5-48　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 5-49 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（C6）下的 Directional Deformation 选项，此时会出现如 5-50 所示的 *X* 方向变形分析云图。

Step5：通过对如图 5-51 所示 Orientation 进行修改来设置不同方向的变形分析云图。

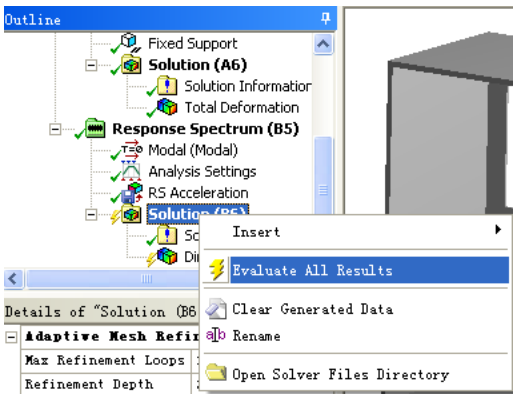


图 5-49　快捷菜单

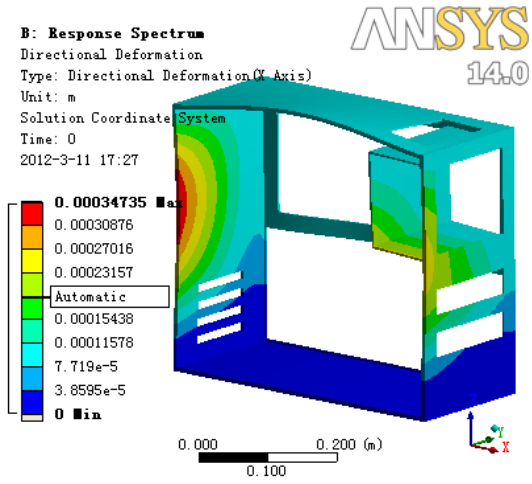


图 5-50　变形

Step6：如图 5-52 所示为 *Z* 方向变形分析云图。

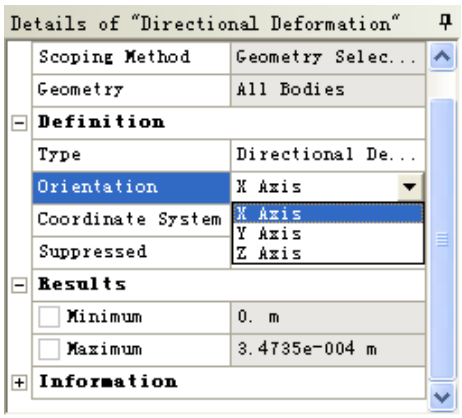


图 5-51　快捷菜单

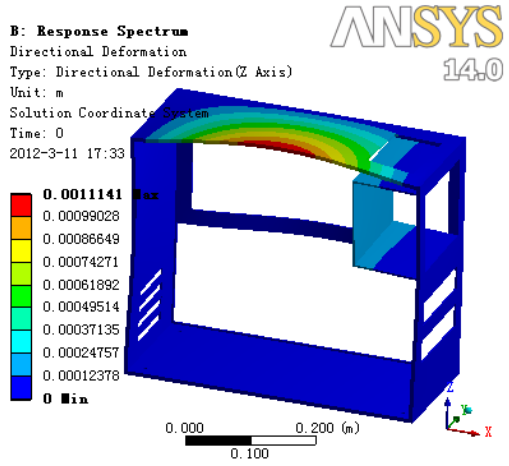


图 5-52　变形

6. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 5-53 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

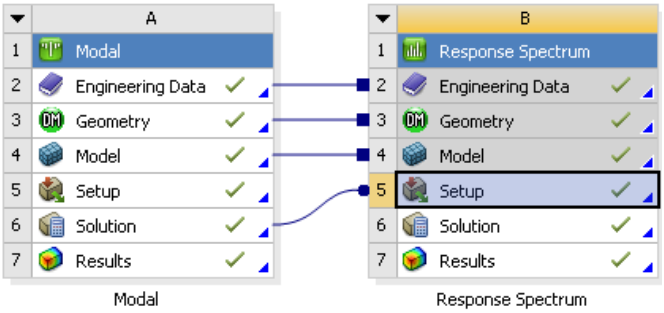


图 5-53　项目管理区中的分析项目

5.4 本章小结

本章节用了两个典型案例详细介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件的响应谱分析模块，包括模态分析的建模方法、网格剖分、边界条件的施加。

通过本章节的学习，读者应该对响应谱分析的过程有详细的了解。

第 6 章

瞬态动力学分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的瞬态动力学分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对瞬态动力学分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件瞬态动力学分析的过程。

（2）了解瞬态动力学分析与其他分析的不同之处。

（3）了解瞬态动力学分析的应用场合。

6.1 瞬态动力学分析简介

瞬态动力学分析是时域分析，是分析结构在随时间变化的载荷作用下，动力响应过程的技术。其输入的数据是作为时间函数的载荷，而输出的结果是随时间变化的位移等量。

瞬态动力学分析应用范围很广，对于如汽车车门、缓冲器、悬挂系统等受各种冲击载荷的结构都适用。

1. 瞬态分析

瞬态动力学分析分为线性瞬态动力学分析和非线性瞬态动力学分析两种类型。

线性瞬态动力学分析是指模型中不包含非线性特征，适用于线性材料、小位移、小应变及刚度不变的结构的瞬态动力学分析。

非线性瞬态动力学分析是指分析过程中可以考虑各种非线性行为，如材料非线性、大变形、大位移、接触碰撞等。

2. 瞬态分析

瞬态动力学分析一般方程为

$$
\begin{aligned}
&[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}''\}+[\boldsymbol{C}]\{\boldsymbol{x}'\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{F}(t)\}\\
&\boldsymbol{\gamma}_i=\{\boldsymbol{x}\}_i^T[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{D}\}\\
&\{\boldsymbol{x}_i\}^T[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}_i\}=\mathbf{1}\\
&\boldsymbol{M}_{ei}=\boldsymbol{\gamma}_i^2=\frac{\boldsymbol{\gamma}_i^2}{\{\boldsymbol{x}_i\}^T[\boldsymbol{M}]\{\boldsymbol{x}_i\}}
\end{aligned}
\qquad (6\text{-}1)
$$

式中，$[\boldsymbol{M}]$ 是质量矩阵；$[\boldsymbol{C}]$ 是阻尼矩阵；$[\boldsymbol{K}]$ 是刚度矩阵；$\{\boldsymbol{x}\}$ 是位移矢量；$\{\boldsymbol{F}(t)\}$ 是力矢量；$\{\boldsymbol{x}'\}$ 是速度矢量；$\{\boldsymbol{x}''\}$ 是加速度矢量。

ANSYS Workbench 14.0 有两种方法求解上述方程，即隐式求解法和显示求解法。

隐式求解法：

- ANSYS 使用 Newmark 时间积分法，也称为开式求解法或修正求解法。
- 积分时间步可以较大，但方程求解时间较长（存在收敛问题）。
- 除了时间步必须很小以外，对大多数问题都是有效的。
- 当前时间点的位移由包含时间点的方程推导出来。

显示求解法：

- ANSYS-LS/DYNA 方法，也称为闭式求解法或预测求解法。
- 积分时间步必须很小，但求解速度很快（没有收敛问题）。
- 可用于波的传播，冲击载荷和高度非线性问题。
- 当前时间点位移由包含时间点的方程推导出来。
- 积分时间步的大小仅受精度条件控制，无稳定性问题。

6.2 项目案例 1——实体梁瞬态动力学分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的瞬态动力学分析模块，计算实体梁模型在 100N 瞬态力作用下的位移响应。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 建模方法及瞬态动力学分析的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	光盘\example\ Beam_Transient.wbpj

1. 问题描述

如图 6-1 所示为某实体梁模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算实体梁模型在-Y 方向作用 100N 的瞬态力下的位移响应情况。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）

命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 6-2 所示。



图 6-1　实体梁模型

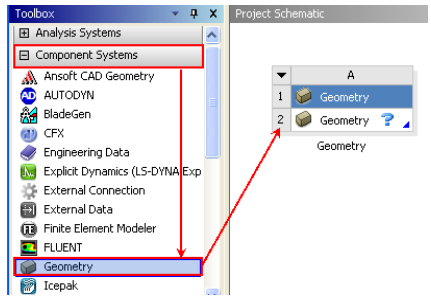


图 6-2　创建分析项目 A

3. 创建几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 New Geometry…命令，如图 6-3 所示，此时会启动 DesignModeler 平台。

Step2：启动 DesignModeler 界面后，同时弹出“单位设置”对话框，如图 6-4 所示，将单位设置为 mm，然后单击 OK 按钮关闭“单位设置”对话框。

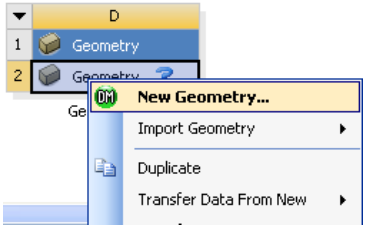


图 6-3　创建几何体

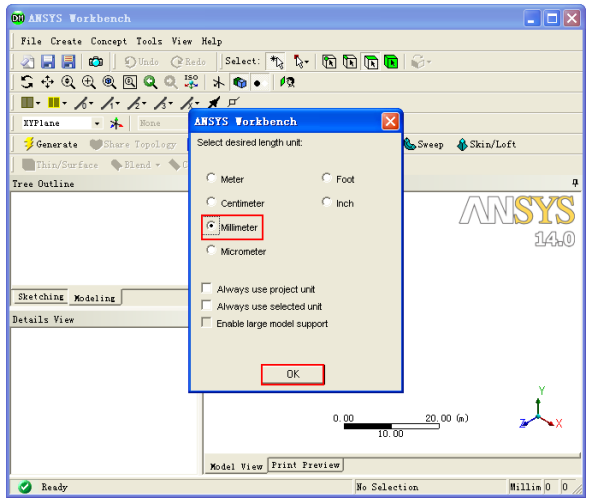


图 6-4　“单位设置”对话框

Step3：选择 Tree Outline 中的 XYPlane 选项，然后在工具栏中单击按钮，如图 6-5 所示，此时 *XY* 平面自动旋转至与屏幕平行。

Step4：单击 Sketching 选项卡，如图 6-6 所示，切换到草绘面板，选择 Draw→Rectangle 命令绘制矩形。

Step5：选择 Dimension→General 命令，如图 6-7 所示，对几何尺寸进行标注。

Step6：选择 Dimension→General 命令，如图 6-8 所示，对几何尺寸进行标注，具体尺寸如下。

*H*1 为 10mm，*L*2 为 5mm，*L*4 为 5mm，*V*3 为 10mm。

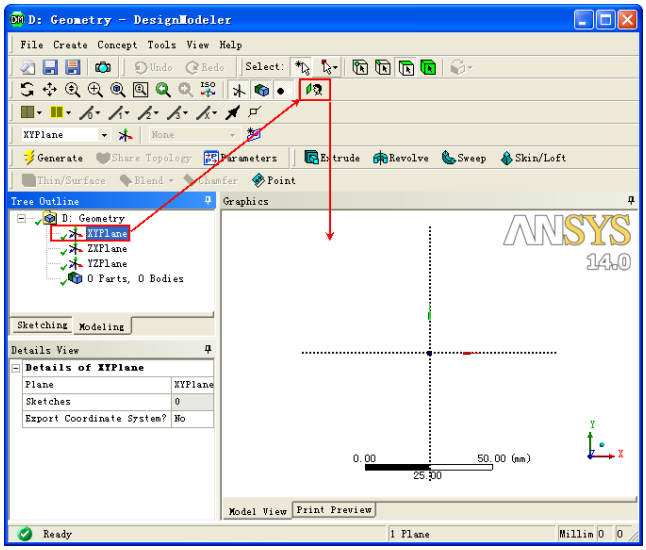


图 6-5　选择草绘平面

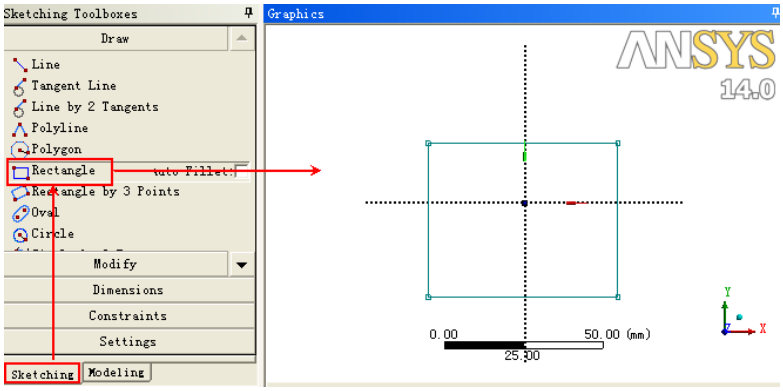


图 6-6　草绘

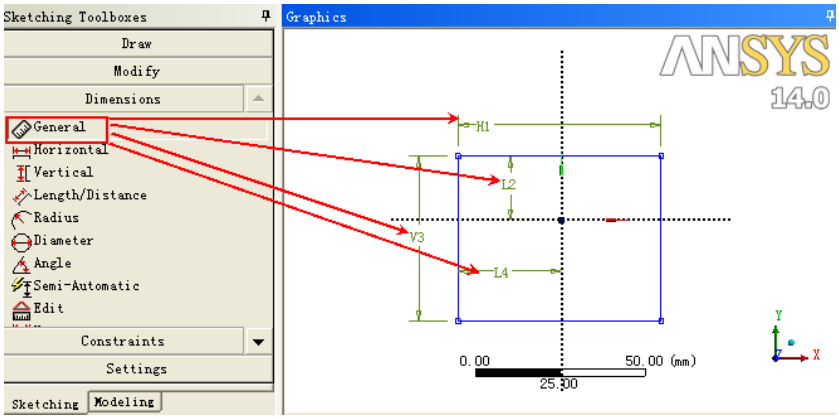


图 6-7　标注

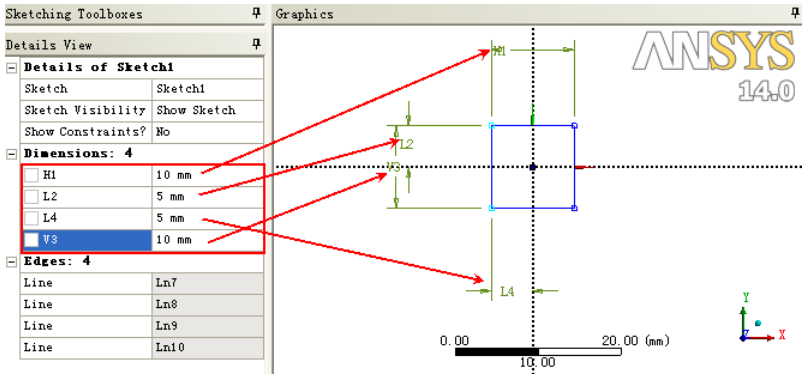


图 6-8　设置尺寸

Step7：单击工具栏中的 Extrude 按钮生成实体，如图 6-9 所示，在 Details View 面板中做如下设置。

① 确保在 Geometry 栏中 Sketch1（草绘）被选中。

② 在 Element Type 中的 FD1，Depth（>0）栏中输入 1000mm，单击工具栏中的 Generate 按钮生成实体。

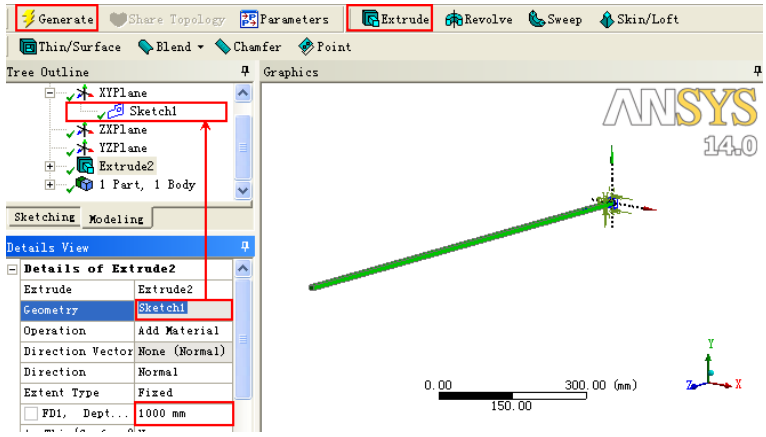


图 6-9　生成实体

Step8：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。

4. 模态分析

选择主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Modal（模态分析）命令，如图 6-10 所示，然后将鼠标移动到项目 A 的 A2（Geometry）中，此时在项目 A 的右侧出现一个项目 B，项目 A 与项目 B 的几何数据实现共享。

5. 创建材料

Step1：双击项目 B 中的 B2Engineering Data 选项，进入如图 6-11 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

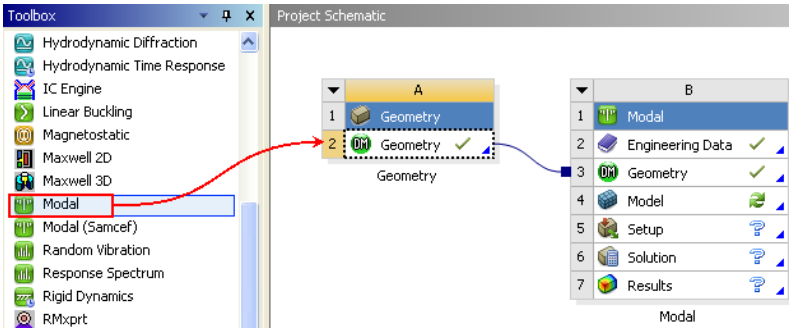


图 6-10　创建模态分析

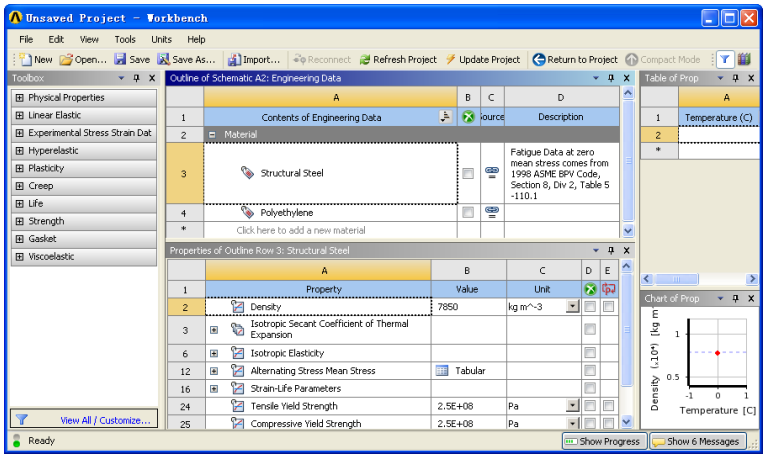


图 6-11　材料参数设置界面

Step2：如图 6-12 所示，在 A4 表格中输入新材料名称，如 NewMaterial。

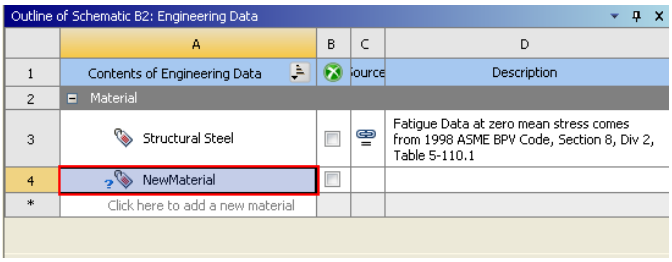


图 6-12　材料名称

Step3：如图 6-13 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Physical Properties→Density 属性直接拖到右下侧的 A2（Property）栏中。

注：在 B2（Value）栏中显示为黄色，表示需要输入数据。

Step4：如图 6-14 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Linear Elastic→Isotropic Elasticity 属性直接拖到右下侧的 A1（Property）栏中。

Step5：如图 6-15 所示，在 B2 栏中输入 7830，单位默认，在 B5 栏中输入 206800000，单位默认，在 B6 栏中输入 0.33，单位默认。

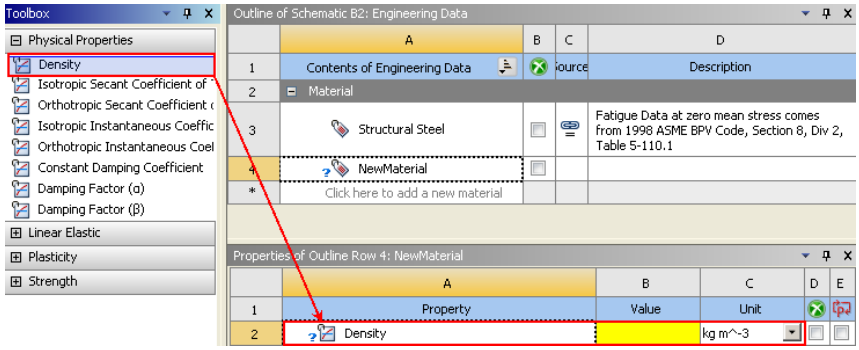


图 6-13　添加密度属性

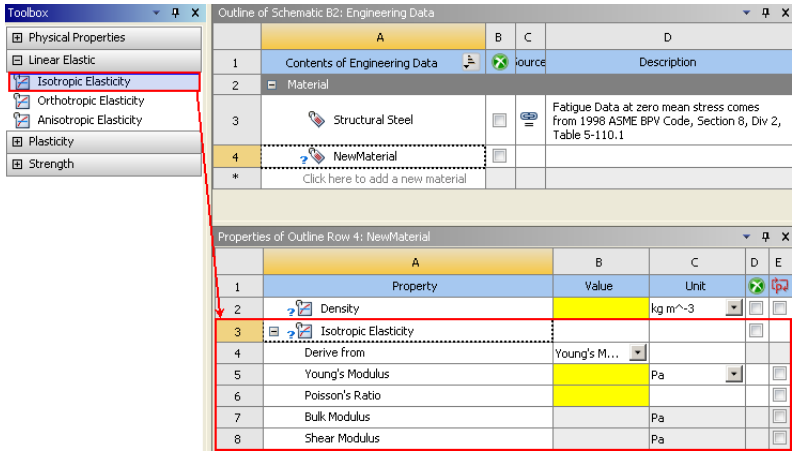


图 6-14　添加各项同性属性

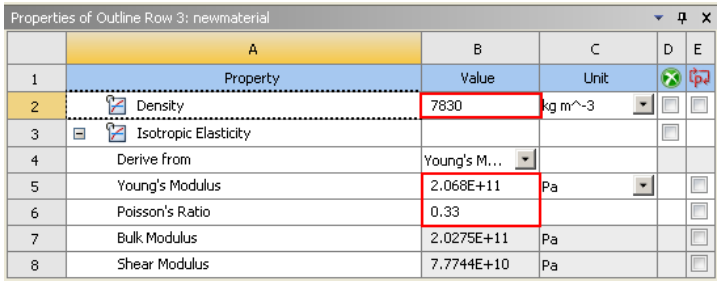


图 6-15　输入数值

Step6：完成新材料的创建后，单击工具栏中的 Return to Project 按钮返回到 Workbench 主界面。

6. 模态分析前处理

Step1：双击项目 B 中的 B4（Model）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 6-16 所示。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Geometry→Solid 命令，此

时可在 Details of “Solid”（参数列表）中设置材料属性，如图 6-17 所示，将新添加的材料 NewMaterial 赋给几何实体。

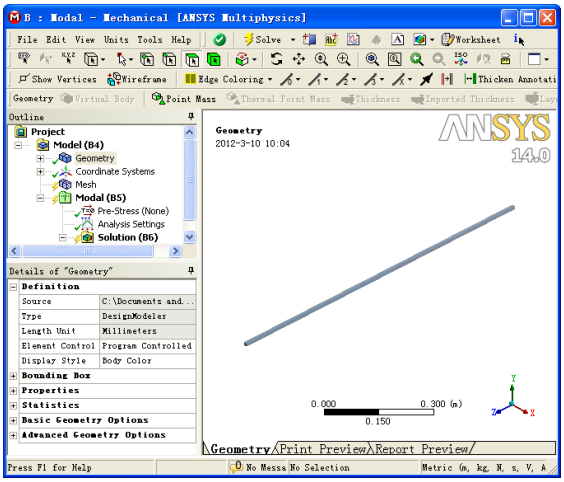


图 6-16　Mechanical 界面

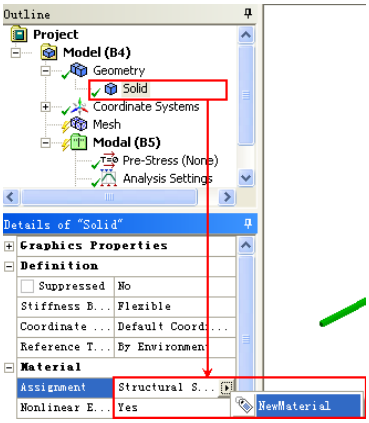


图 6-17　赋予材料属性

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 6-18 所示，在 Sizing 中的 Element Size 中输入 0.05m，其余采用默认设置。

Step4：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 6-19 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 6-20 所示。

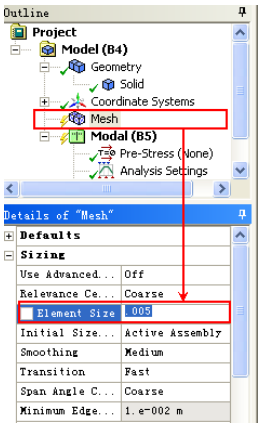


图 6-18　设置网格大小

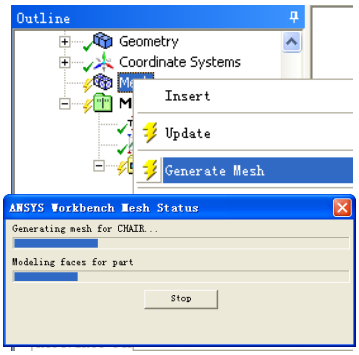


图 6-19　划分网格

7. 施加约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项，此时会出现如图 6-21 所示的 Environment 工具栏。

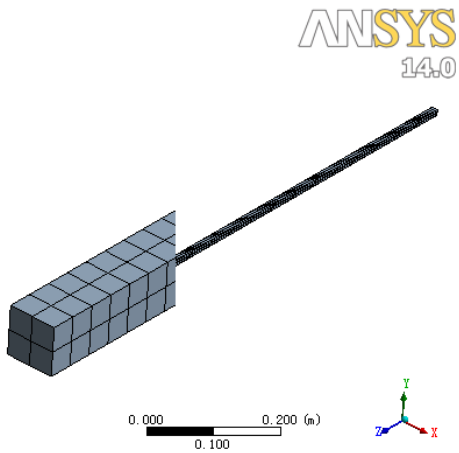


图 6-20　网格效果

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 6-22 所示。

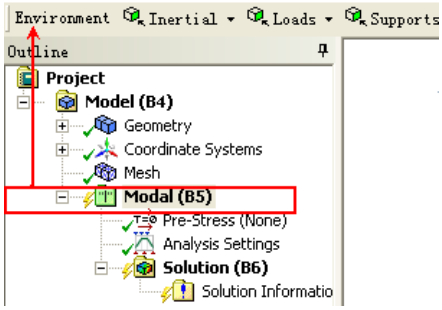


图 6-21　Environment 工具栏

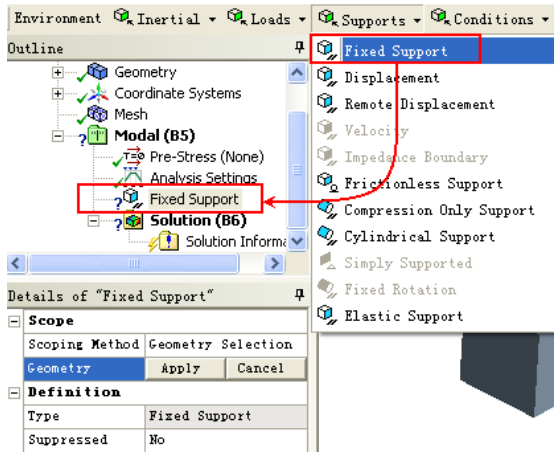


图 6-22　添加固定约束

Step3：单击工具栏中的（选择面）按钮，然后选择工具栏中的按钮中的，使其变成（框选择）按钮，选择 Fixed Support 选项，选择实体单元的一端（位于 Z 轴最大值的一端），确保 Details of "Fixed Support"中 Geometry 栏中出现 1Face，表明端面被选中，即可在选中面上施加固定约束，如图 6-23 所示。

Step4：在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 6-24 所示。

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 6-25 所示的 Solution 工具栏。

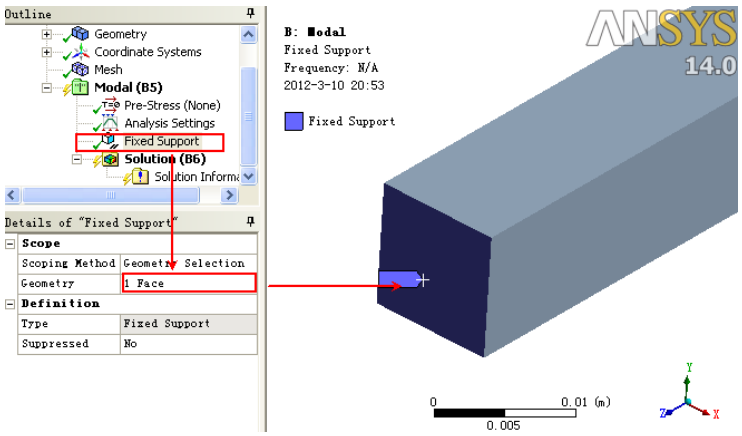


图 6-23　施加固定约束

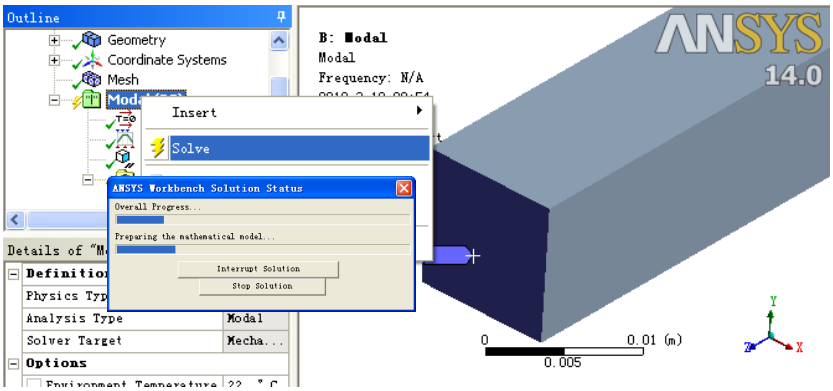


图 6-24　求解

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 6-26 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

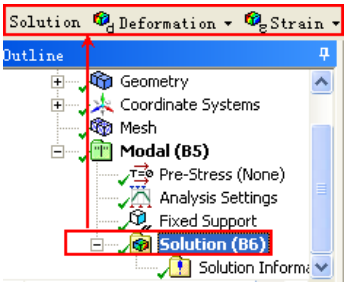


图 6-25　Solution 工具栏

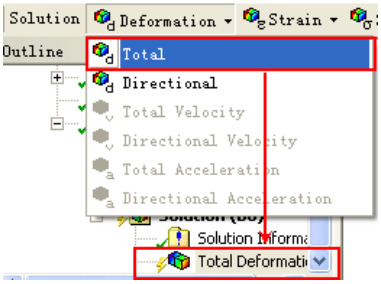


图 6-26　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡Evaluate All Results 命令，如图 6-27 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形）

选项，此时会出现如图 6-28 所示的一阶模态总变形分析云图。

Step5：如图 6-29 所示为计算机机箱前六阶模态频率。

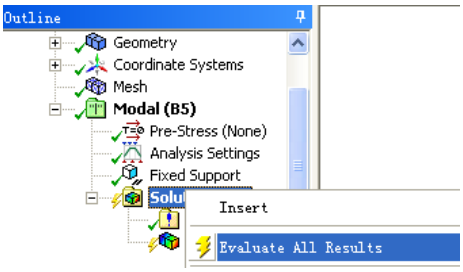


图 6-27　快捷菜单

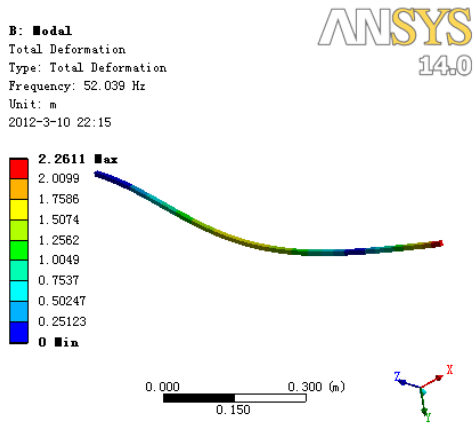


图 6-28　一阶变形

Step6：ANSYS Workbench 14.0 默认的模态阶数为六阶，选择 Outline（分析树）中 Modal（B5）下的 Analysis Settings（分析设置）选项，在下面如图 6-30 所示的 Details of “Analysis Settings”下面的 Options 中有 Max Modes to Find 选项，在此选项中可以修改模态数量。

Step7：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	8.3076
2	2.	8.3076
3	3.	52.039
4	4.	52.039
5	5.	145.6
6	6.	145.6

图 6-29　各阶模态频率

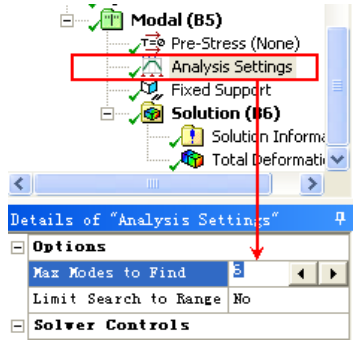


图 6-30　修改模态数量选项

9. 瞬态动力学分析

Step1：回到 Workbench 主界面，如图 6-31 所示，选择 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Transient Structural（瞬态分析）命令不放，直接拖曳到项目 B（Modal）的 B6 中。

Step2：如图 6-32 所示，在项目 B 与项目 C 直接实现了数据共享，此时在项目 C 中的 C5（Setup）会出现标识。

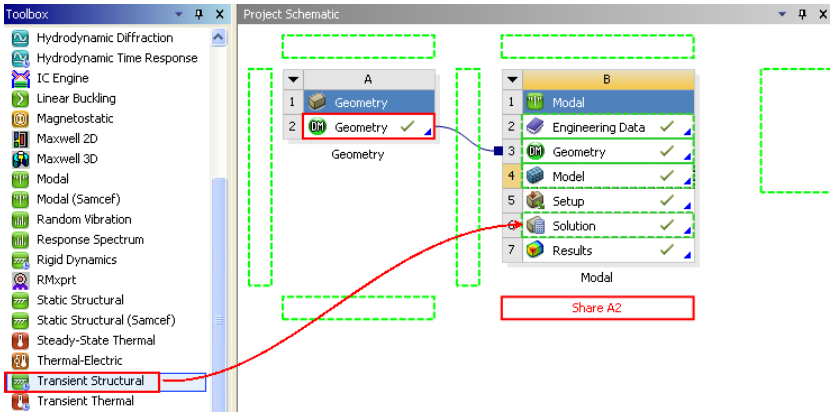


图 6-31　瞬态动力学分析

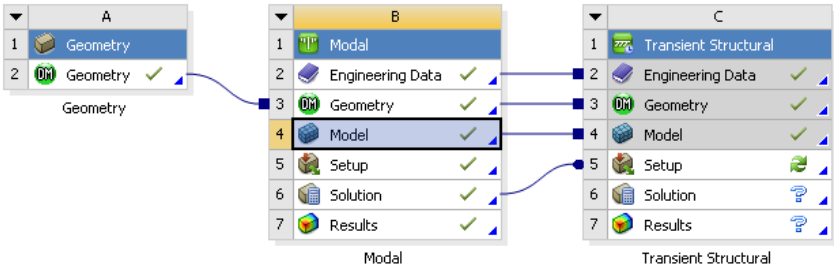


图 6-32　数据共享

Step3：如图 6-33 所示，双击项目 C 的 C5（Setup）选项，进入 Mechanical 界面。

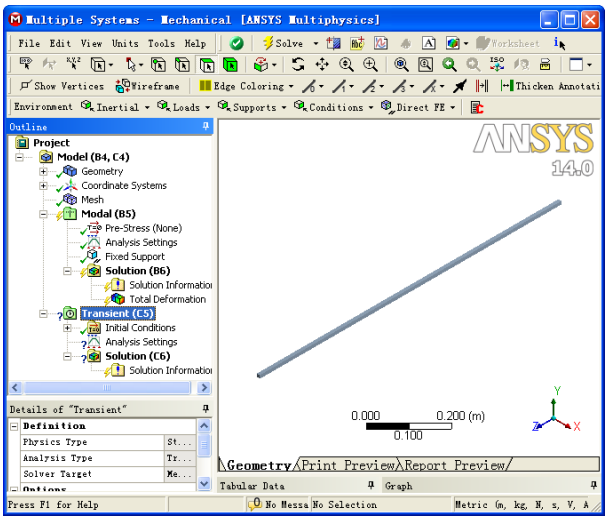


图 6-33　Mechanical 界面

Step4：如图 6-34 所示，在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择⚡Solve 命令。

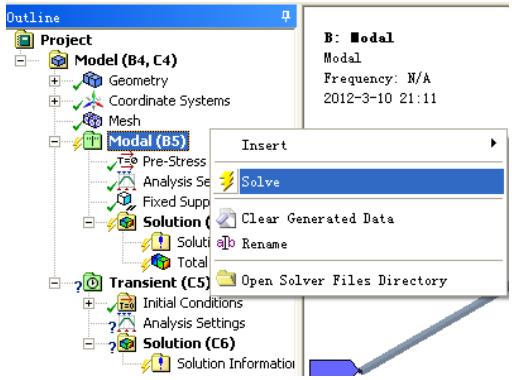


图 6-34　执行模态计算

10. 添加动态力载荷

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient（C5）选项，此时会出现如图 6-35 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，如图 6-36 所示，此时在分析树中会出现 Force 选项。

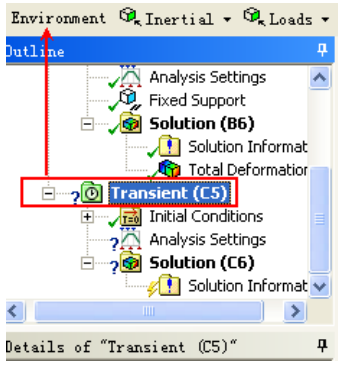


图 6-35　Environment 工具栏

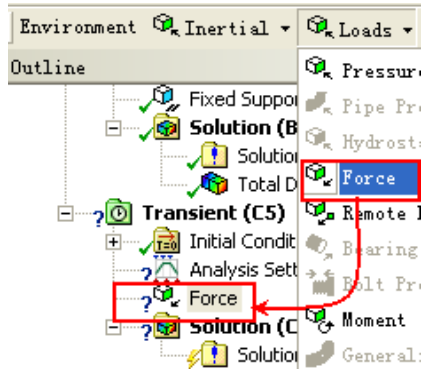


图 6-36　添加激励

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient（C5）→Force（力）命令，在下面出现的如图 6-37 所示的 Details of “Force”面板中做如下更改。

① 在 Scope→Geometry 中选择实体梁模型的另一端（*Z* 值为 0 的一端）。

② 在 Definition→Define By 栏中选择 Components 选项，然后在右侧的 Y Component 表格中填入-100N；保持 X Component 和 Z Component 值为 0。

Step4：在 Outline（分析树）中选择 Transient（C5）→Analysis Settings（分析设置）选项，如图 6-38 所示，在出现的 Details of “Analysis Settings”面板中做如下输入。

① 在 Number Of Steps 栏中输入 2，表示计算共有两个分析步。

② 在 Current Step Number 栏中输入 1，表示当前分析为步骤 1。

③ 在 Step End Time 栏中输入 0.1s，表示这个分析步持续时间为 0.1s。

④ 在 Time Step 栏中输入 1.e-002s，表示时间步为 0.01s。

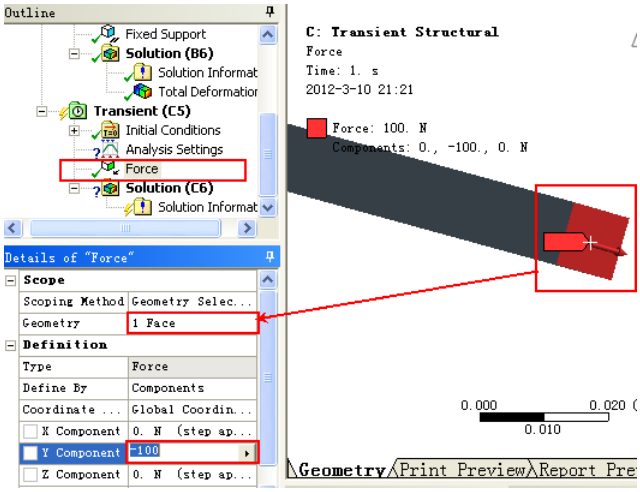


图 6-37　力属性面板

Step5：同样，如图 6-39 所示，在 Current Step Number 栏中输入 2，在 Step End Time 栏中输入 7.5s。

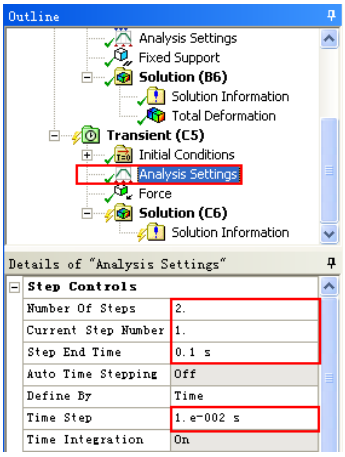


图 6-38　分析步一设定

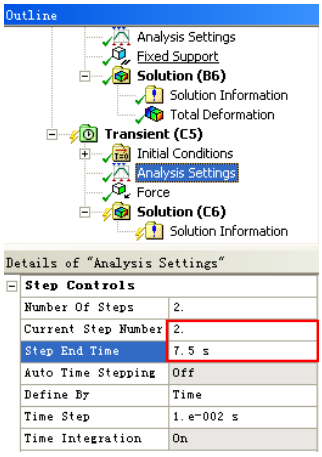


图 6-39　分析步二设定

Step6：选择如图 6-40 所示的 Force 命令，右下角会弹出一个 Tabular Data 表格，在表格中输入表 6-1 中的数值。

表 6-1　载荷时间表

	Steps	Times（s）	X[N]	Y[N]	Z[N]
1	1	0	0	0	0
2	1	0.1	0	-100	0
3	2	0.2	0	0	0
4	2	7.5	0	0	0

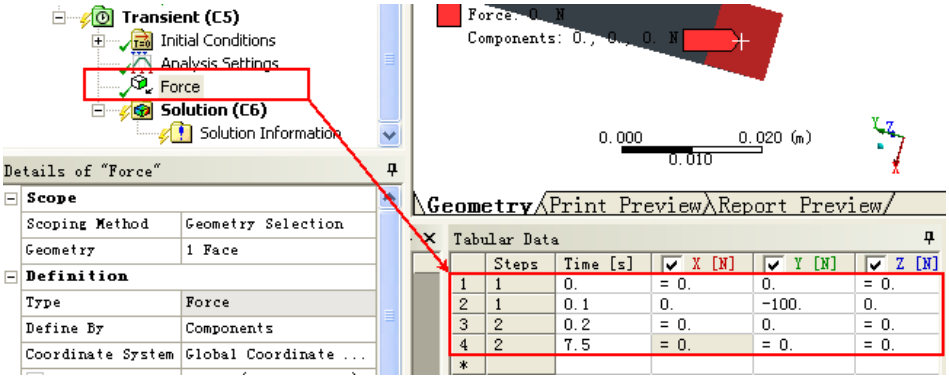


图 6-40　输入数值

Step7：如图 6-41 所示，选择 Transient（C5）→Analysis Settings 命令，在出现的 Details of "Analysis Settings"面板中做如下输入。

① 在 Damping Controls→Numerical Damping 栏中选择 Manual 选项。

② 在 Numerical Damping 栏中将阻尼比改成 0.5。

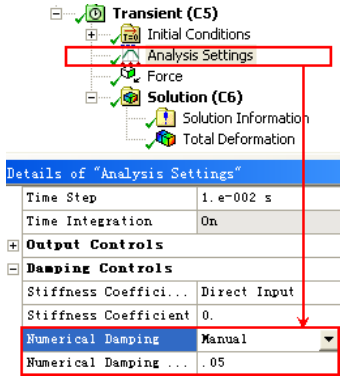


图 6-41　设定阻尼比

Step8：如图 6-42 所示，在 Transient（C5）选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

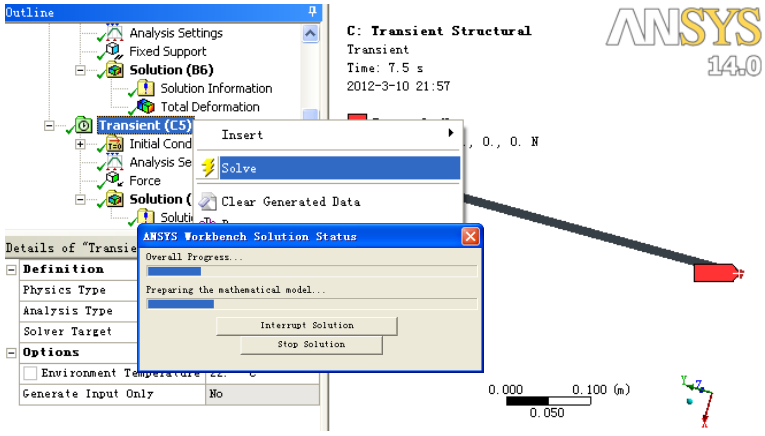


图 6-42　计算求解

11. 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项，此时会出现如图 6-43 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 6-44 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation 选项。

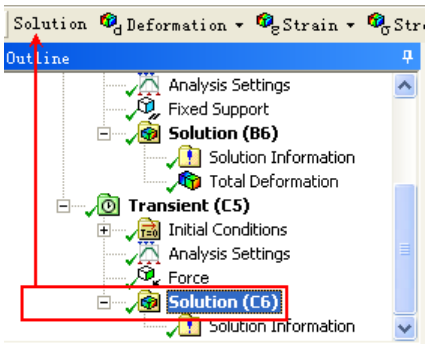


图 6-43　Solution 工具栏

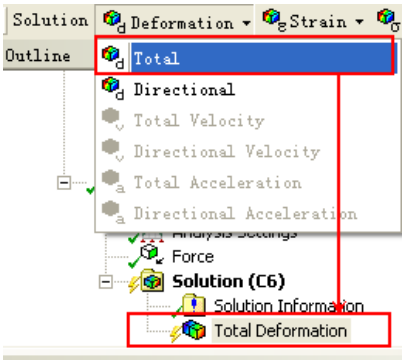


图 6-44　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 6-45 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（C6）下的 Directional Deformation 选项，此时会出现如图 6-46 所示的变形分析云图。

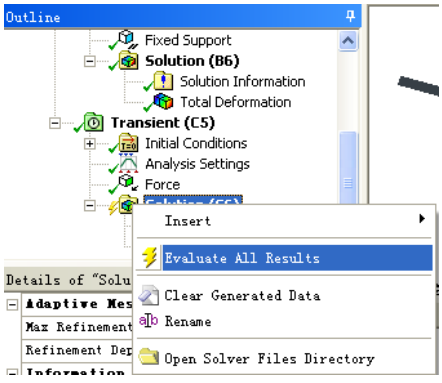


图 6-45　快捷菜单

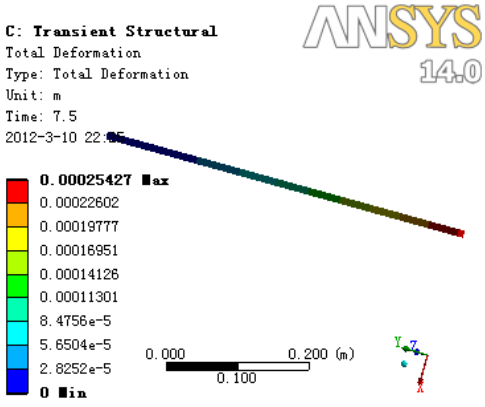


图 6-46　变形分析云图

Step5：如图 6-47 所示为位移随时间变化的曲线。

12. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 6-48 所示。

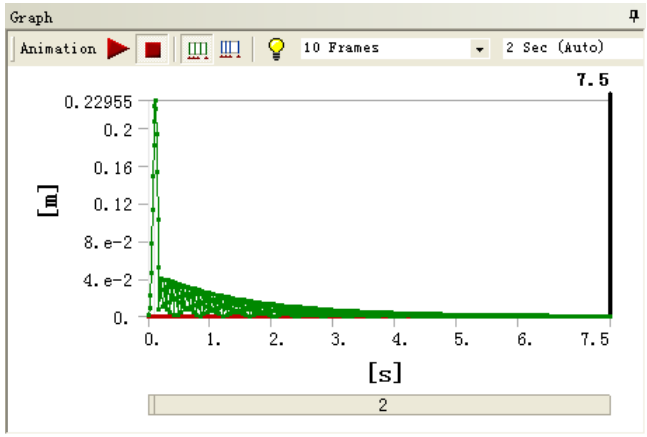


图 6-47　位移响应曲线

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 Beam_Transient。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

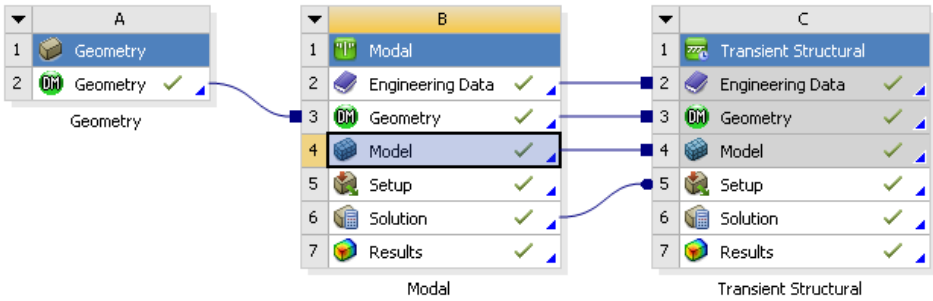


图 6-48　项目管理区中的分析项目

6.3　项目案例 2——弹簧瞬态动力学分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的瞬态动力学分析模块，计算实体梁模型在 1000N 瞬态力作用下的位移响应。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 瞬态动力学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ extension_spring.x_t
结果文件	光盘\example\ Spring_Transient.wbpj

1. 问题描述

如图 6-49 所示为某实体梁模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算弹簧模型在-*Y* 方向作用 1000N 的瞬态力下的位移响应情况。

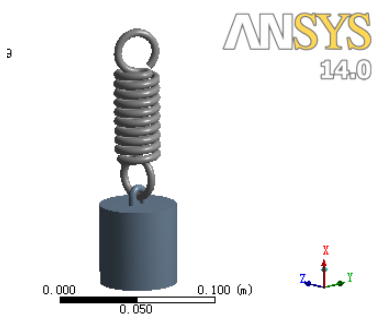


图 6-49　弹簧模型

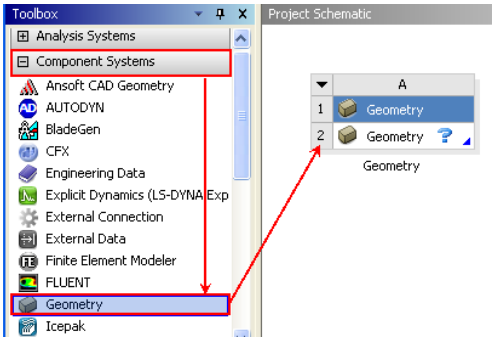


图 6-50　创建分析项目 A

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 6-50 所示。

3. 创建几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 6-51 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：选择文件路径，如图 6-52 所示，选择文件 extension_spring.x_t，并单击“打开”按钮。

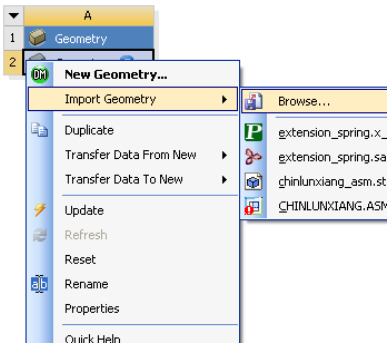


图 6-51　导入几何体

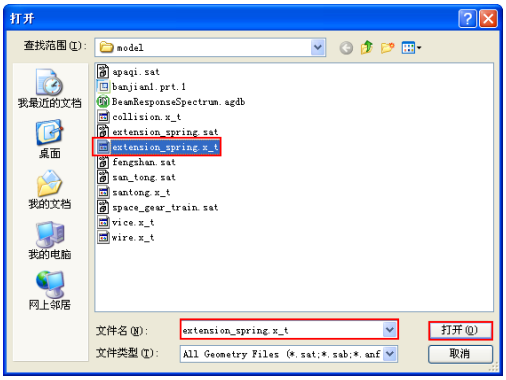


图 6-52　选择文件

Step3：双击项目 A 中的 A2（Geometry）选项，此时会加载 DesignModeler，设置单位为 mm，关闭“单位设置”对话框，如图 6-53 所示，单击工具栏中的 Generate 按钮，生成弹簧几何实体。

Step4：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。

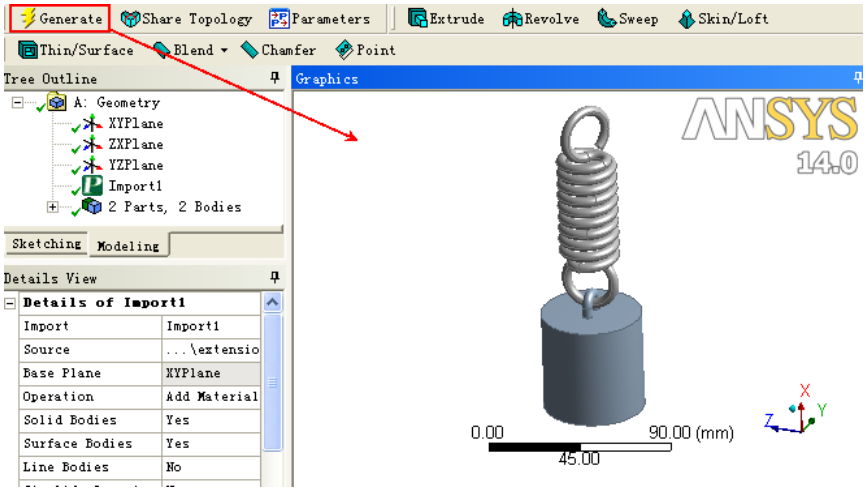


图 6-53　生成几何

4. 模态分析

选择主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Modal（模态分析）命令，如图 6-54 所示，然后将鼠标移动到项目 A 的 A2（Geometry）中，此时在项目 A 的右侧出现一个项目 B，项目 A 与项目 B 的几何数据实现共享。

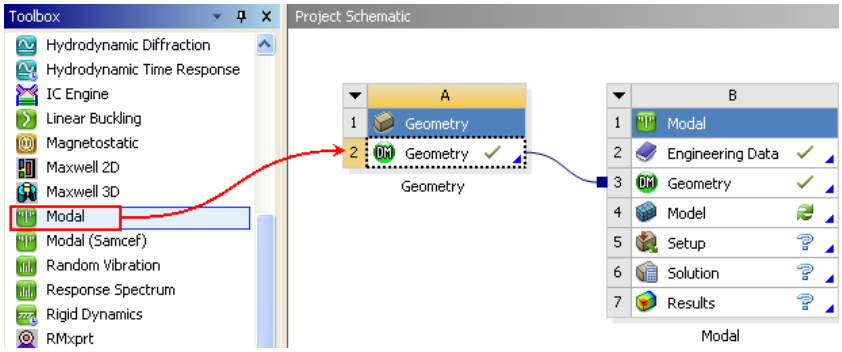


图 6-54　创建模态分析

5. 模态分析前处理

Step1：双击项目 B 中的 B4（Model）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 6-55 所示。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Connections→Contacts→Contact Region 命令，在如图 6-56 所示的 Details of “Contact Region”面板中做如下设置。

在 Definition→Type 中选择接触类型为 Bonded。

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 6-57 所示在 Sizing 中的 Relevance Center 中选择 Fine 项，其余采用默认设置。

Step4：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 6-58 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 6-59 所示。

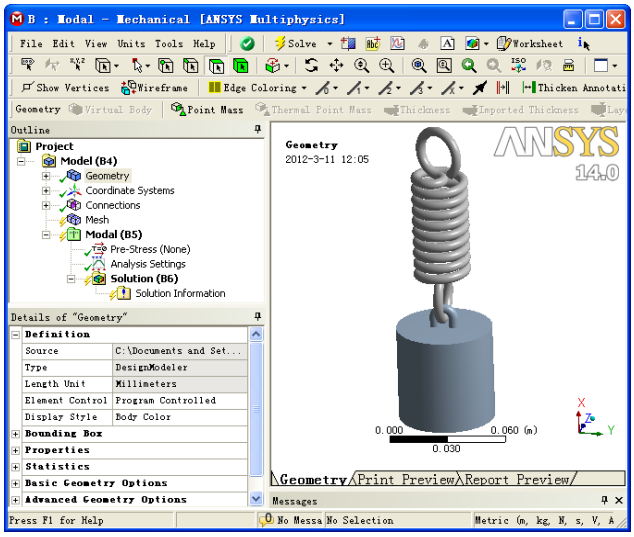


图 6-55　Mechanical 界面

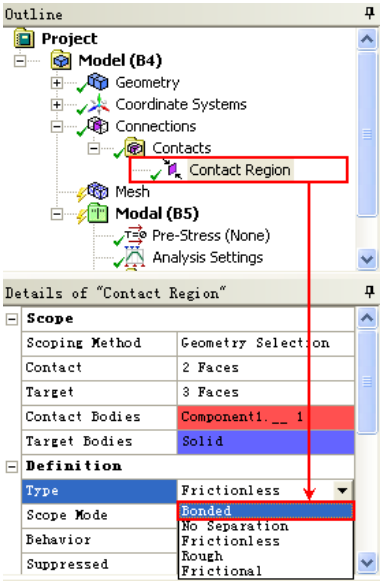


图 6-56　接触类型设置

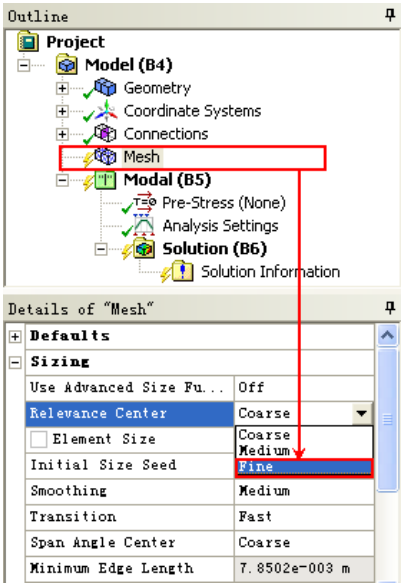


图 6-57　设置网格大小

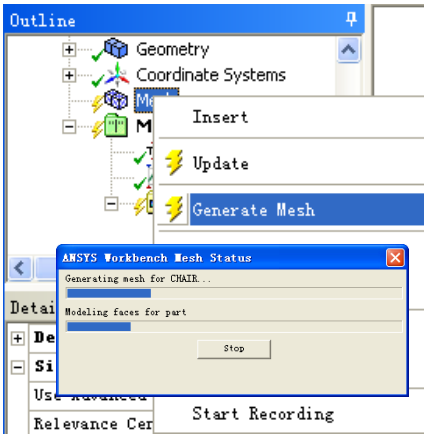


图 6-58　划分网格

6. 施加约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项，此时会出现如图 6-60 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）

命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 6-61 所示。

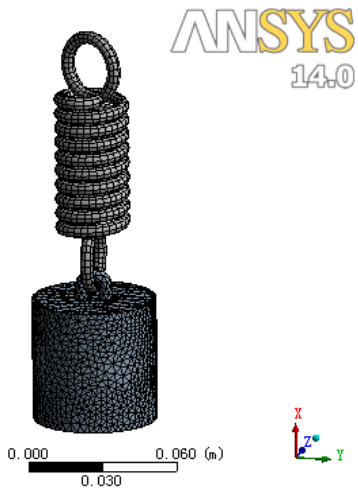


图 6-59　网格效果

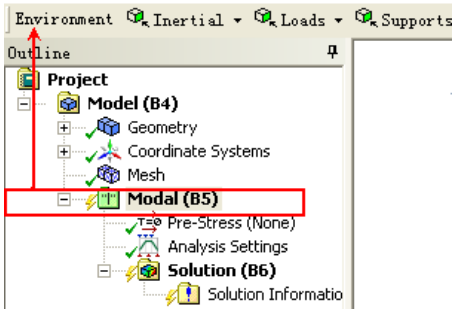


图 6-60　Environment 工具栏

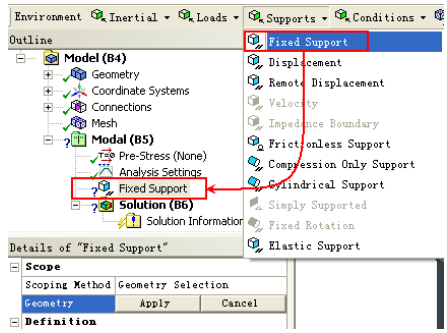


图 6-61　添加固定约束

Step3：单击工具栏中的（选择面）按钮，然后选择工具栏中的按钮中的，使其变成（框选择）按钮，选择 Fixed Support 选项，选择实体单元的一端（位于 *Z* 轴最大值的一端），确保 Details of "Fixed Support"中 Geometry 栏中出现 2Faces，表明上述两个面被选中，此时可在选中面上施加固定约束，如图 6-62 所示。

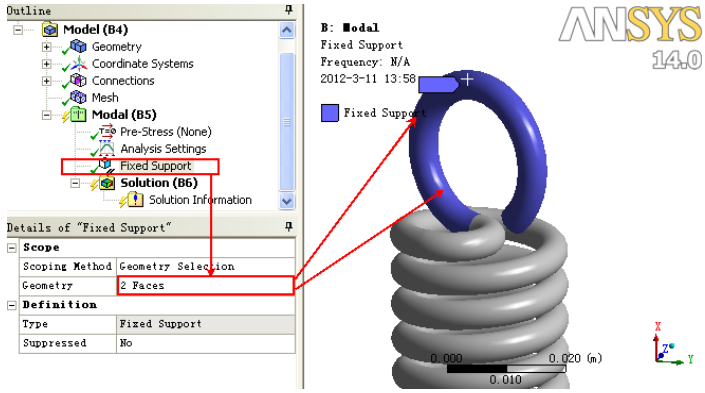


图 6-62　施加固定约束

Step4：在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 6-63 所示。

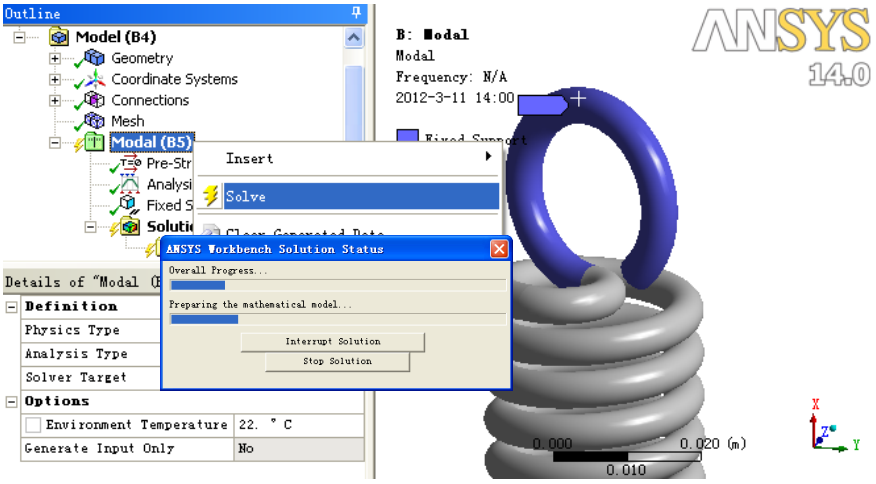


图 6-63　求解

7. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 6-64 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 6-65 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

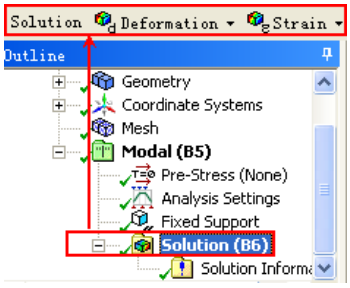


图 6-64　Solution 工具栏

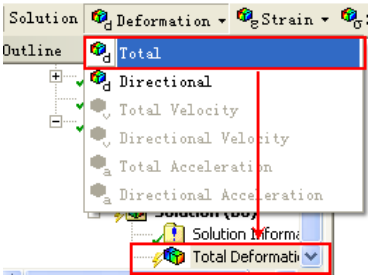


图 6-65　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 6-66 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 6-67 所示的一阶模态总变形分析云图。

Step5：图 6-68 所示为计算机机箱前六阶模态频率。

Step6：ANSYS Workbench 14.0 默认的模态阶数为六阶，选择 Outline（分析树）中 Modal（B5）下的 Analysis Settings（分析设置）选项，在下面如图 6-69 所示的 Details of

“Analysis Settings”下面的 Options 中有 Max Modes to Find 选项，在此选项中可以修改模态数量。

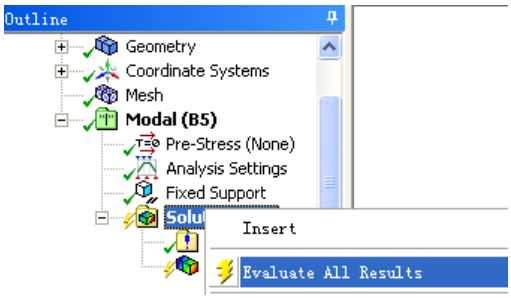


图 6-66　快捷菜单

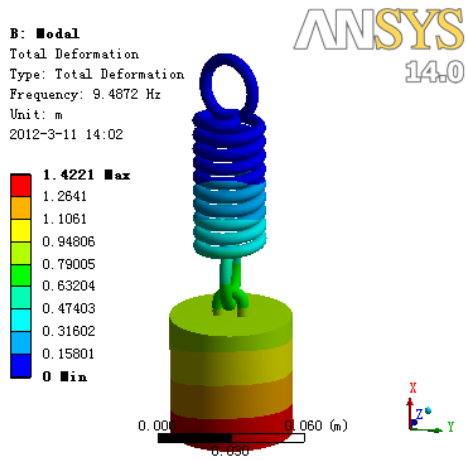
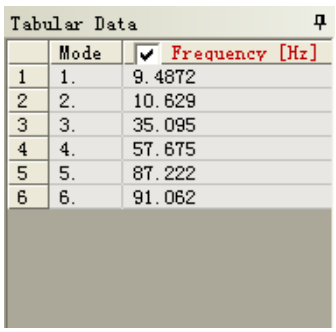


图 6-67　一阶变形

Step7：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。



	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	9.4872
2	2.	10.629
3	3.	35.095
4	4.	57.675
5	5.	87.222
6	6.	91.062

图 6-68　各阶模态频率

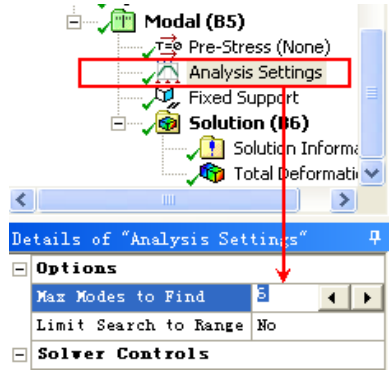


图 6-69　修改模态数量选项

8. 瞬态动力学分析

Step1：回到 Workbench 主界面，如图 6-70 所示，选择 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Transient Structural（瞬态分析）命令不放，直接拖曳到项目 B（Modal）的 B6 中。

Step2：如图 6-71 所示，在项目 B 与项目 C 直接实现了数据共享，此时在项目 C 中的 C5（Setup）会出现标识。

Step3：如图 6-72 所示，双击项目 C 的 C5（Setup）选项，进入 Mechanical 界面。

Step4：如图 6-73 所示，在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择Solve 命令。

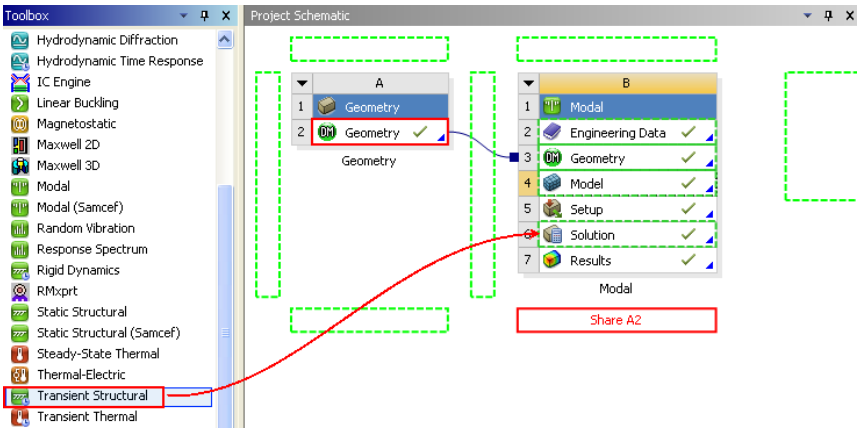


图 6-70　瞬态动力学分析

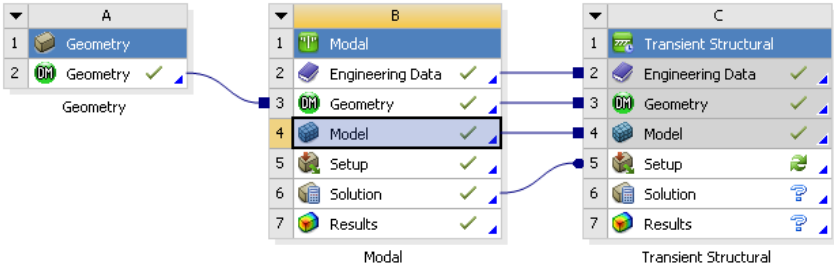


图 6-71　数据共享

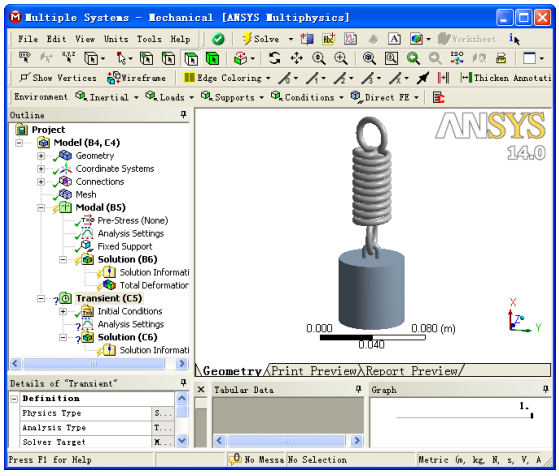


图 6-72　Mechanical 界面

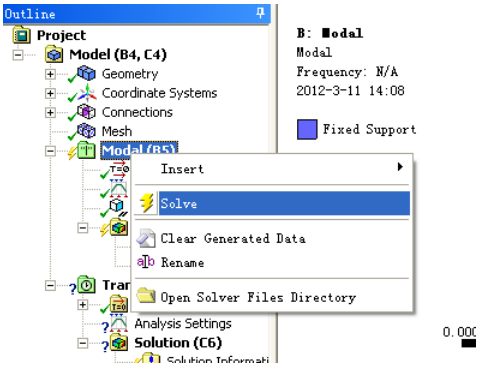


图 6-73　执行模态计算

9. 添加动态力载荷

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient（C5）选项，此时会出现如图 6-74 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，如图 6-75 所示，此时在分析树中会出现 Force 选项。

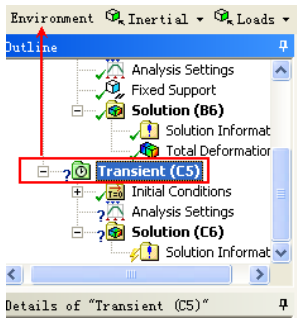


图 6-74　Environment 工具栏

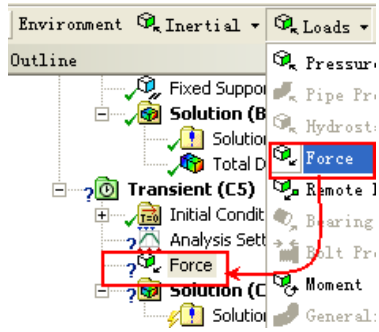


图 6-75　添加激励

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient（C5）→Force（力）命令，在下面出现的如图 6-76 所示的 Details of “Force”面板中做如下更改。

① 在 Scope→Geometry 中选择圆柱底端。

② 在 Definition→Define By 栏中选择 Components 选项，然后在右侧的 X Component 表格中填入−1000N；保持 Y Component 和 Z Component 值为 0。

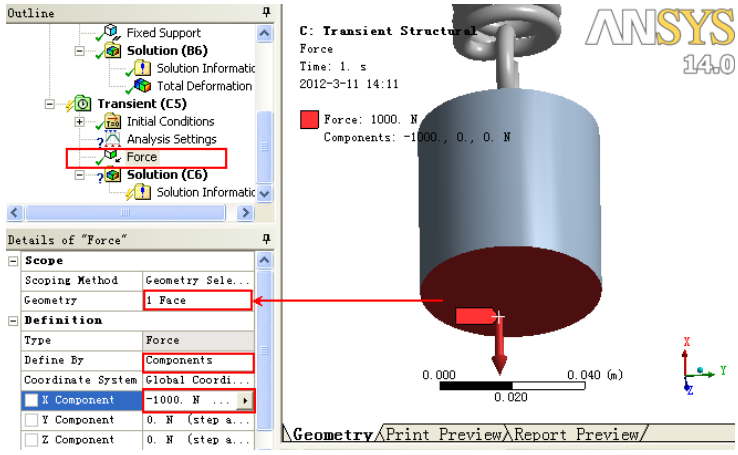


图 6-76　力属性面板

Step4：在 Outline（分析树）中选择 Transient（C5）→Analysis Settings（分析设置）选项，如图 6-77 所示，在出现的 Details of “Analysis Settings”面板中做如下输入。

① 在 Number Of Steps 栏中输入 2，表示计算共有两个分析步。

② 在 Current Step Number 栏中输入 1，表示当前分析为步骤 1。

③ 在 Step End Time 栏中输入 0.1s，表示这个分析步持续时间为 0.1s。

④ 在 Time Step 栏中输入 1.e-002s，表示时间步为 0.01s。

Step5：同样，如图 6-78 所示，在 Current Step Number 栏中输入 2，在 Step End Time 栏中输入 10s，其余设置与图 6-77 相同。

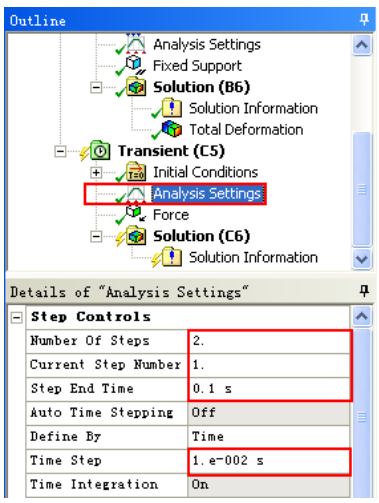


图 6-77　分析步一设定

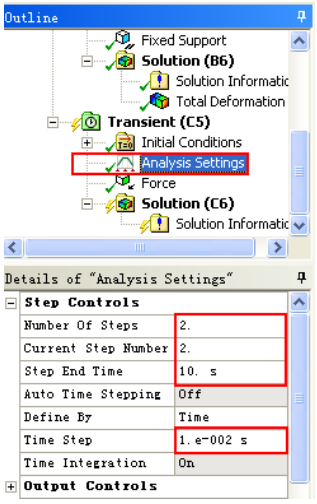


图 6-78　分析步二设定

Step6：选择如图 6-79 所示的 Force 选项，右下角会弹出一个 Tabular Data 表格，在表格中输入表 6-2 中的数值。

表 6-2　载荷时间表

	Steps	Times（s）	X[N]	Y[N]	Z[N]
1	1	0	0	0	0
2	1	0.1	−1000	0	0
3	2	0.15	0	0	0
4	2	10	0	0	0

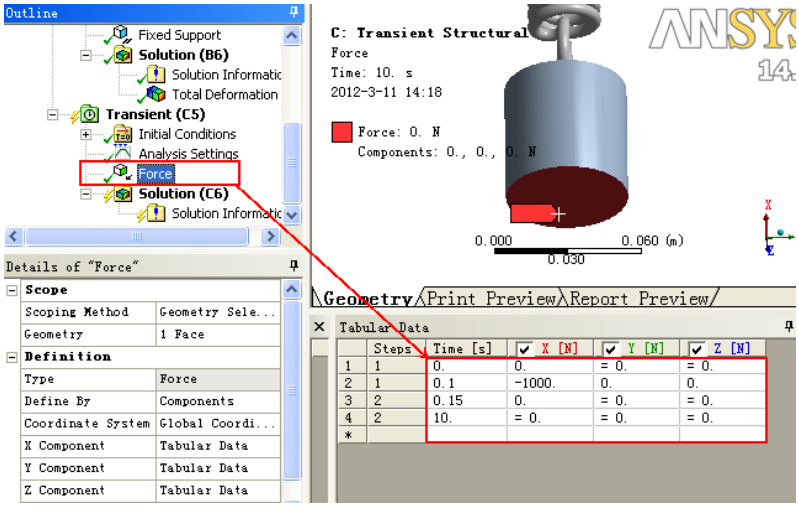


图 6-79　输入数值

Step7：如图 6-80 所示，选择 Transient（C5）→Analysis Settings 命令，在出现的 Details of “Analysis Settings”面板中做如下输入。

① 在 Damping Controls→Numerical Damping 栏中选择 Manual 选项。

② 在 Numerical Damping 栏中将阻尼比改成 0.02。

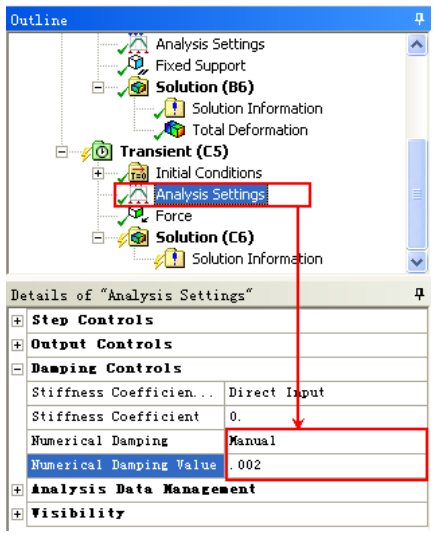


图 6-80　设定阻尼比

Step8：如图 6-81 所示，在 Transient（C5）选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

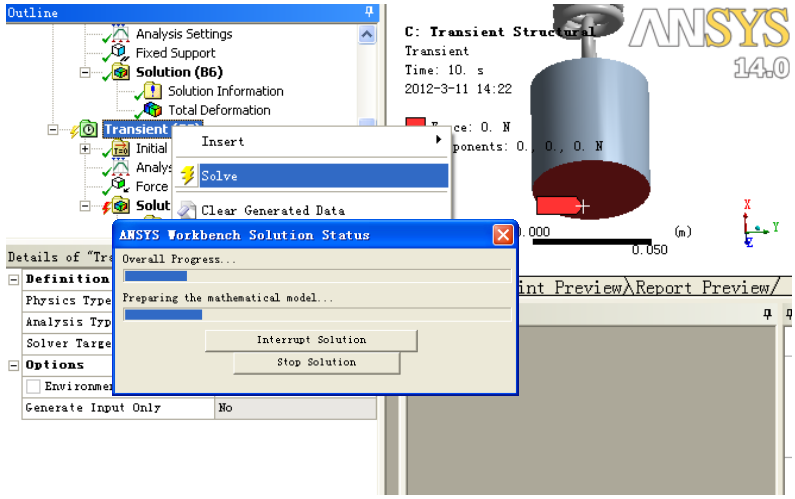


图 6-81　计算求解

10. 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项，此时会出现如图 6-82 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 6-83 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation 选项。

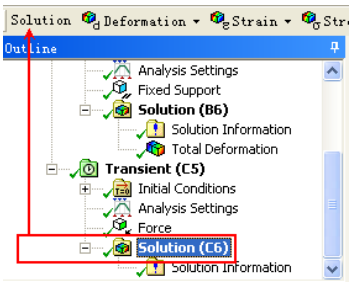


图 6-82　Solution 工具栏

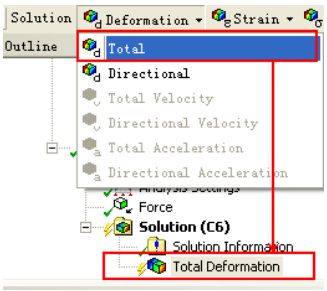


图 6-83　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 6-84 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（C6）下的 Directional Deformation 选项，此时会出现如图 6-85 所示的变形分析云图。

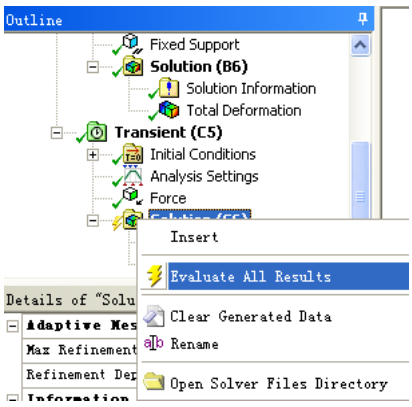


图 6-84　快捷菜单

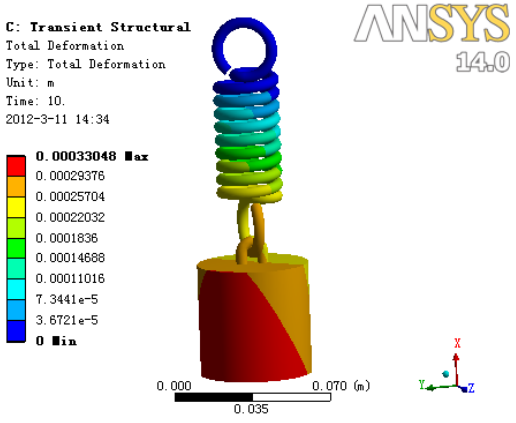


图 6-85　变形

Step5：图 6-86 所示为位移随时间变化的曲线。

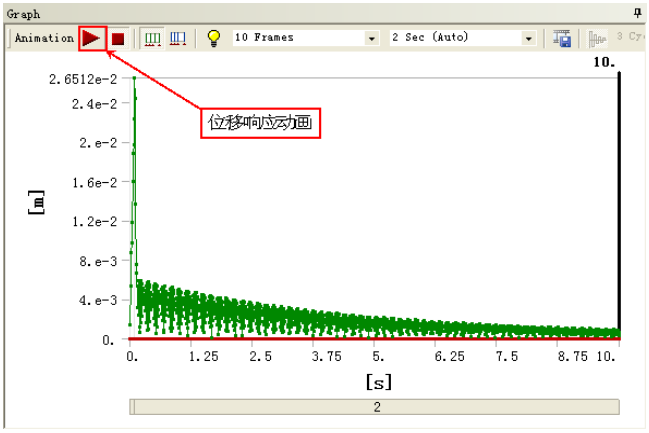


图 6-86　位移响应曲线

11. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 6-87 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 Spring_Transient。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

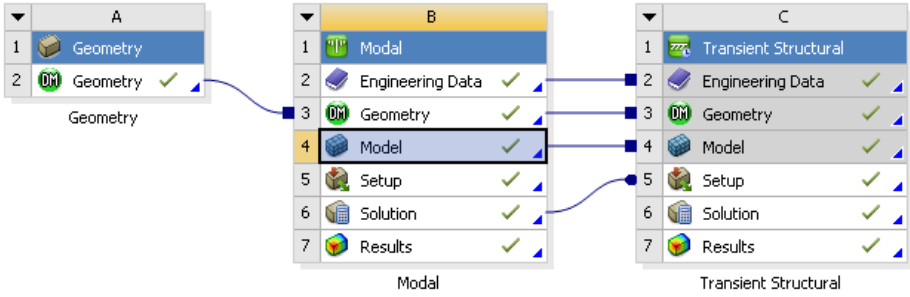


图 6-87　项目管理区中的分析项目

6.4 本章小结

本章节用了两个典型案例详细介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件的瞬态动力学分析模块，包括瞬态动力学分析的建模方法、网格剖分、边界条件的施加，同时还详细介绍了含有接触的瞬态动力学分析的分析方法及操作步骤。

通过本章节的学习，读者应该对瞬态动力学分析的过程有详细的了解。

第 7 章

随机振动分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的随机振动分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对随机振动分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件随机振动分析的过程。

（2）了解随机振动分析与其他分析的不同之处。

（3）了解随机振动分析的应用场合。

7.1 随机振动分析简介

随机振动分析是基于概率的谱分析，主要应用于如火箭发射时结构承受的载荷谱，每次发射的谱不同，但统计规律相同。

随机振动分析的的目的是应用基于概率的概率谱密度分析，分析载荷作用过程中的统计规律。

概率谱密度（PSD）是激励和响应的方差随频率的变化。

- PSD 曲线围成的面积是响应的方差。
- PSD 的单位是方差/Hz，如加速度功率谱的单位是 G^2/Hz 等。
- PSD 可以是位移、速度、加速度、力或者压力。

随机振动的输入量为结构的自然频率和振型、功率谱密度曲线。

随机振动的输出量为1σ 、 2σ 、 3σ 位移和应力（用于疲劳分析）。其中，1σ 是概率为 68.3%时的分布云图；2σ 是概率为 95.951%时的概率分布；3σ 是概率为 99.737%时的分布云图。

7.2 项目案例 1——随机振动学分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的随机振动学分析模块，计算塔架模型随机振动响应。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 随机振动学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ BeamResponseSpectrum.agdb
结果文件	光盘\example\ Beam_Random_Vibration.wbpj

1. 问题描述

如图 7-1 所示为某塔架模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算塔架模型基础在外加速度谱工况下的位移响应情况。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 7-2 所示。

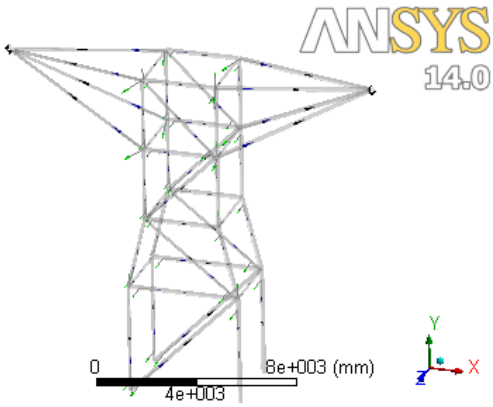


图 7-1　塔架模型

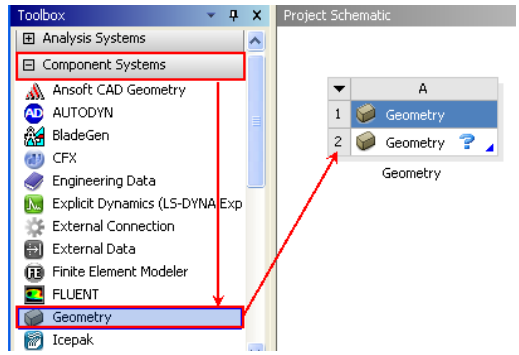


图 7-2　创建分析项目 A

3. 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 7-3 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 BeamResponseSpectrum.agdb 几何体文件，如图 7-4 所示，此时 A2Geometry 后的 变为，表示实体模型已经存在。

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry 选项，此时会进入到 DesignModeler 界面，在 DesignModeler 软件绘图区域会显示几何模型，如图 7-5 所示。

Step4：单击工具栏上的按钮保存文件，此时弹出如图 7-6 所示的“另存为”对话框，输入文件名为 Beam_Random_Vibration.，单击“保存”按钮。

Step5：回到 DesignModeler 界面并单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

4. 模态分析

Step1：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Modal（模态分析）

命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 B（Modal），如图 7-7 所示。

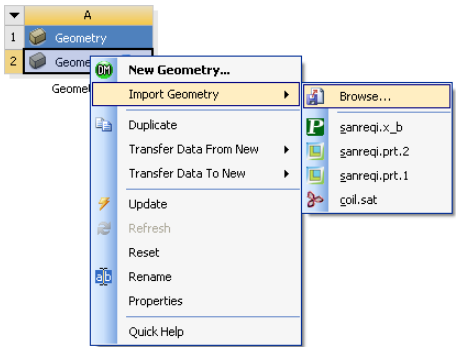


图 7-3　导入几何体

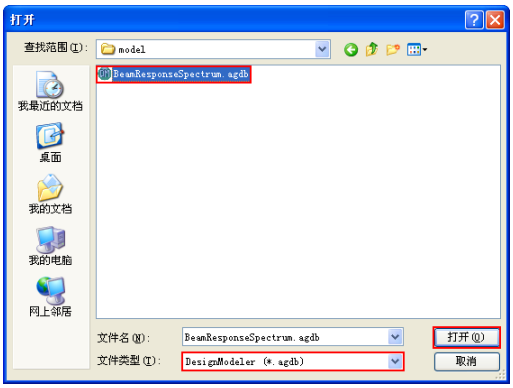


图 7-4　“打开”对话框

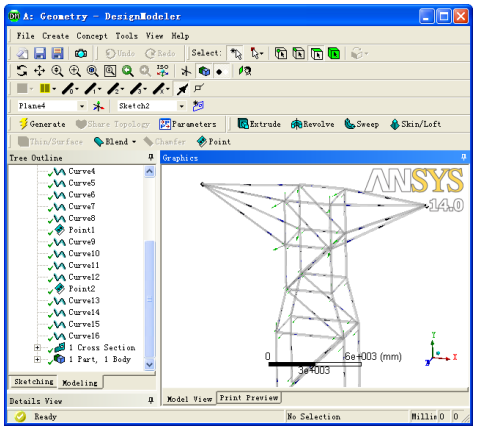


图 7-5　DesignModeler 界面

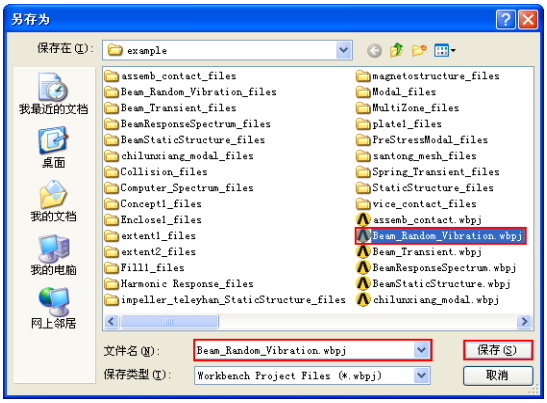


图 7-6　保存工程文件

Step2：如图 7-8 所示，将项目 A 中的 A2（Geometry）选项直接拖曳到项目 B 中的 B3（Geometry）中，此时在 B3 栏中出现一个提示符 Share A2，此提示符表示 B3（Geometry）几何数据与 A2（Geometry）几何数据实现共享。

5. 添加材料库

双击项目 B 中的 B2Engineering Data 选项，进入如图 7-9 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

6. 划分网格

Step1：双击项目 B 中的 B4（Model）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 7-10 所示。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 7-11 所示，在 Sizing 中的 Element Size 中输入 0.10m，其余采用默认设置。

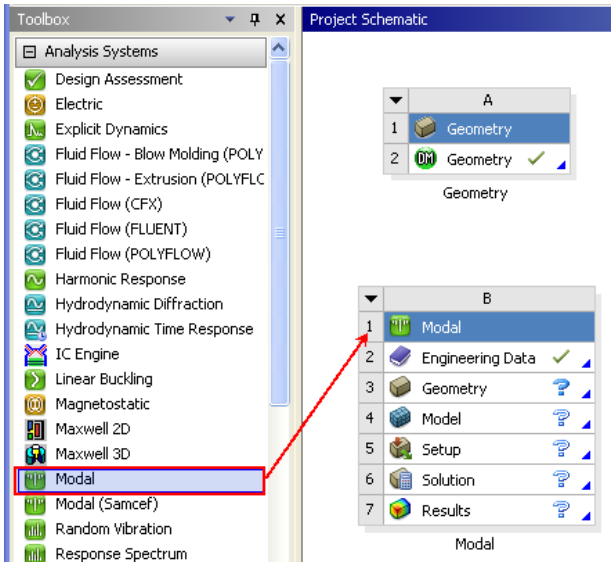


图 7-7　创建模态分析

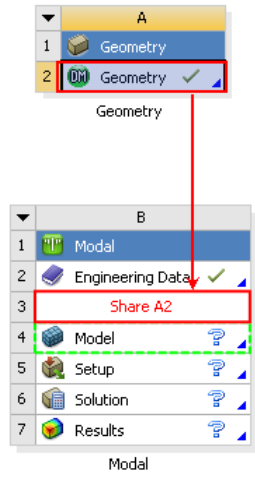


图 7-8　几何数据共享

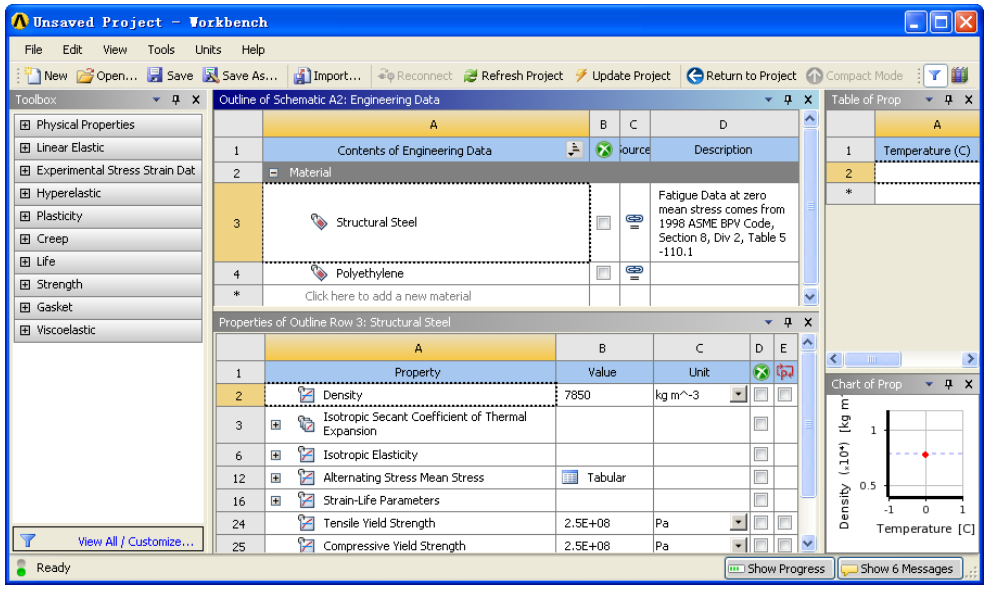


图 7-9　材料参数设置界面

Step3：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 7-12 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 7-13 所示。

7. 施加约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项，此时会出现如图 7-14 所示的 Environment 工具栏。

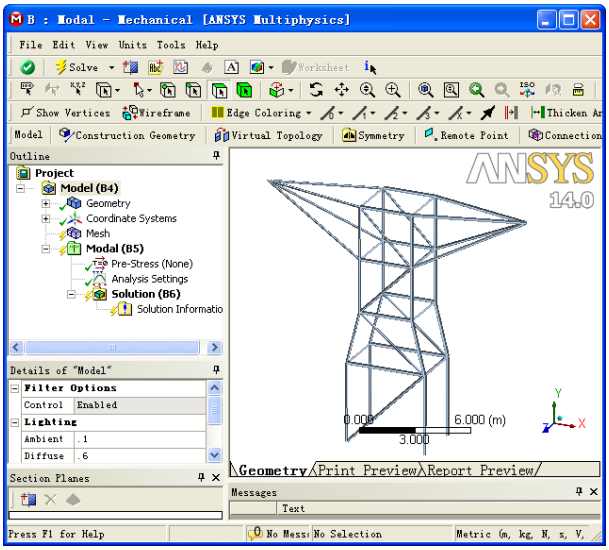


图 7-10　Mechanical 界面

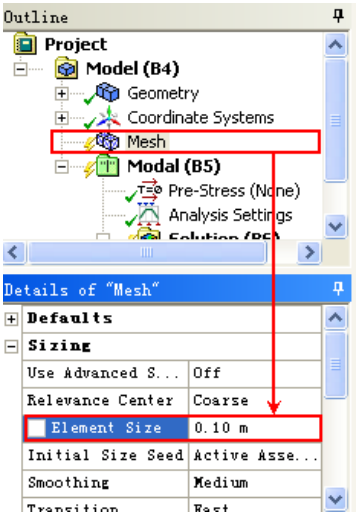


图 7-11　设置网格大小

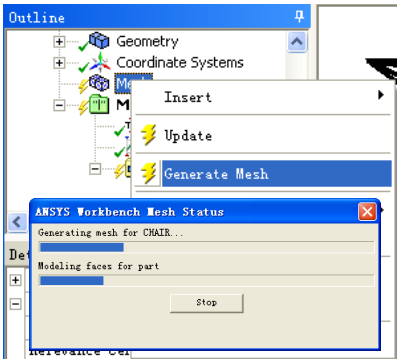


图 7-12　划分网格

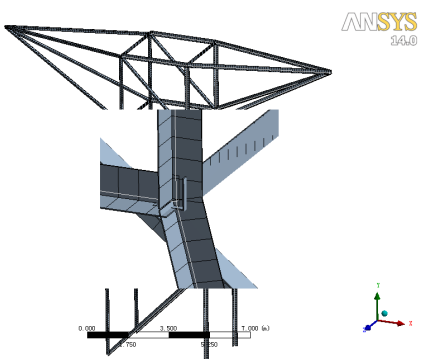


图 7-13　网格效果

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 7-15 所示。

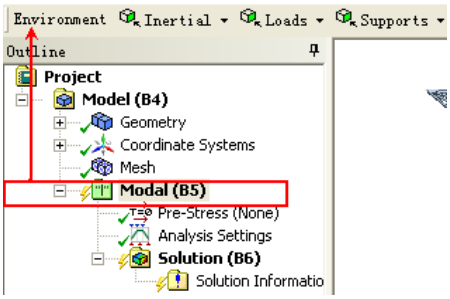


图 7-14　Environment 工具栏

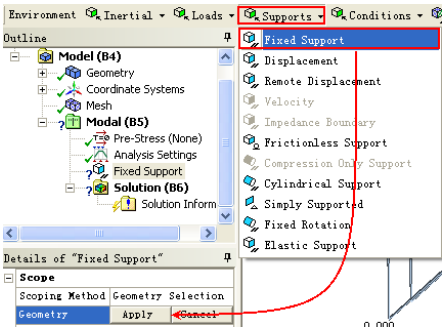


图 7-15　添加固定约束

Step3：单击工具栏中的（选择点）按钮，然后选择工具栏中的按钮中的，使其变成（框选择）按钮，选择 Fixed Support 选项，选择塔架的下端四个节点，单击

Details of “Fixed Support”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束，如图 7-16 所示。

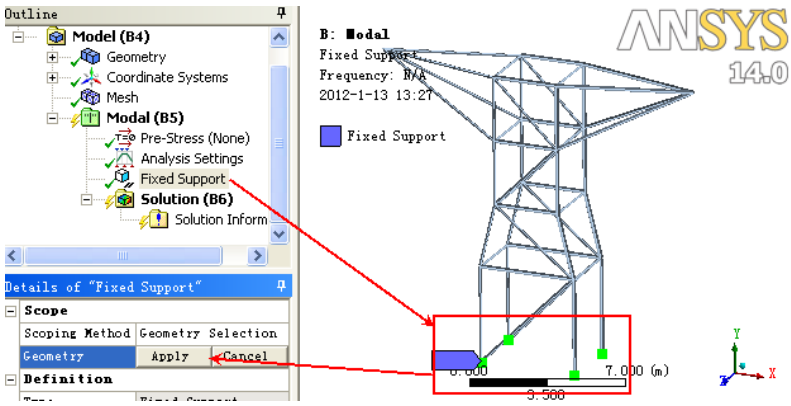


图 7-16　施加固定约束

Step4：在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 7-17 所示。

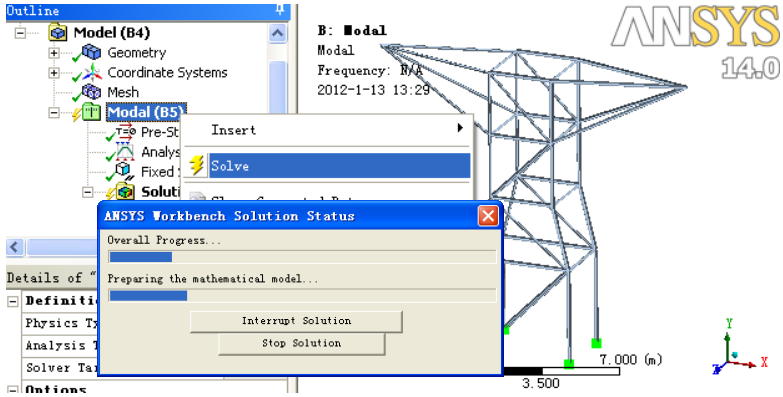


图 7-17　求解

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 7-18 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 7-19 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

Step3：如图 7-20 所示，右击 Solution 选项，在弹出的菜单中选择 Evaluate All Results 命令，此时开始进行后处理计算。

Step4：图 7-21 所示为塔架的一阶变形图。

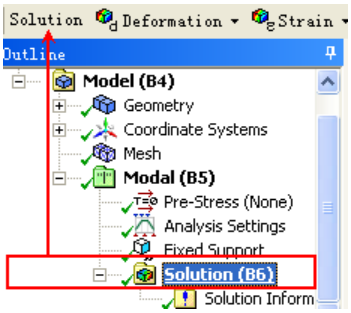


图 7-18　Solution 工具栏

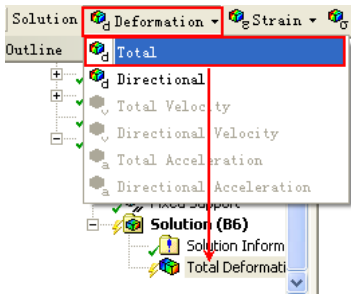


图 7-19　添加变形选项

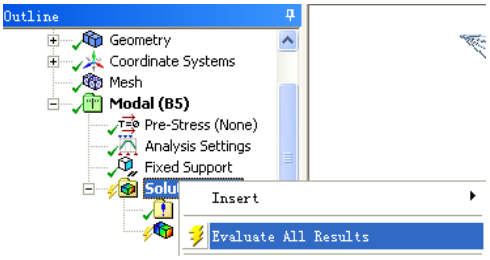


图 7-20　快捷菜单

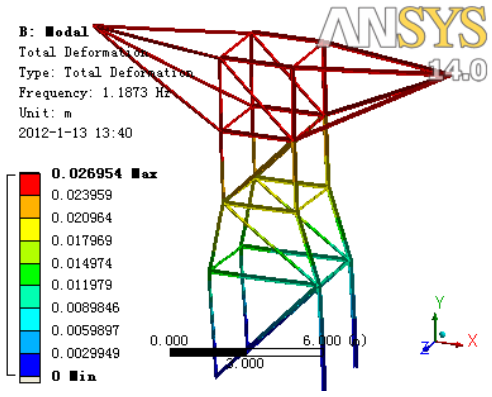
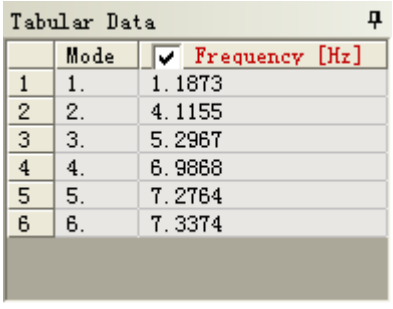


图 7-21　一阶变形

Step5：图 7-22 所示为塔架的前六阶自振频率。

Step6：在 Modal（B5）下面的 Analysis Settings 中可以修改模态数量，图 7-23 所示为软件默认的计算前六阶模态。



Tabular Data

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	1.1873
2	2.	4.1155
3	3.	5.2967
4	4.	6.9868
5	5.	7.2764
6	6.	7.3374

图 7-22　各阶模态频率

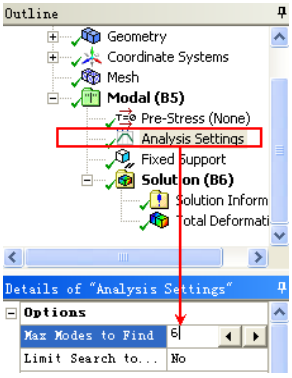


图 7-23　修改模态数量选项

9. 随机振动分析

Step1：回到 Workbench 主界面，如图 7-24 所示，选择 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Random Vibration（随机振动分析）命令不放，直接拖曳到项目 B（Modal）的 B6 中。

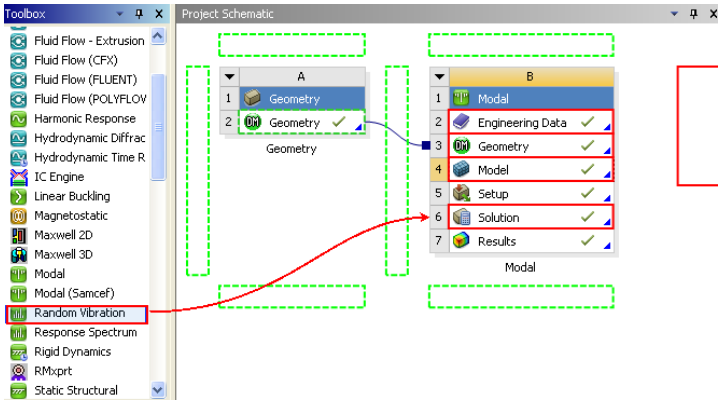


图 7-24　随机振动分析

Step2：如图 7-25 所示，在项目 B 与项目 C 直接实现了数据共享，此时在项目 C 中的 C5（Setup）会出现 标识。

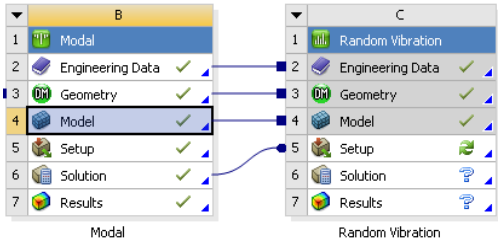


图 7-25　数据共享

Step3：双击如图 7-25 所示 C5 栏，此时启动如图 7-26 所示的 Mechanical 平台。

Step4：右击如图 7-27 所示的 Modal 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，进行求解计算。

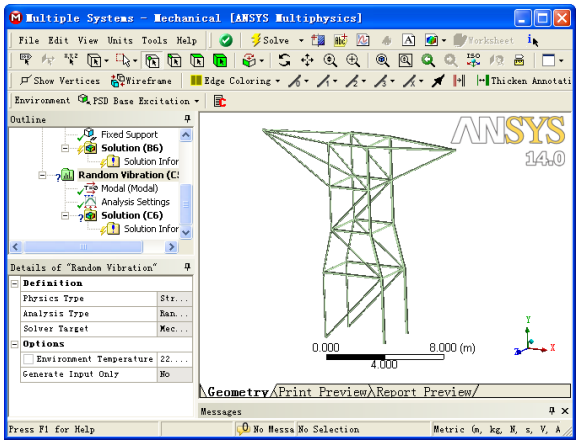


图 7-26　Mechanical 界面

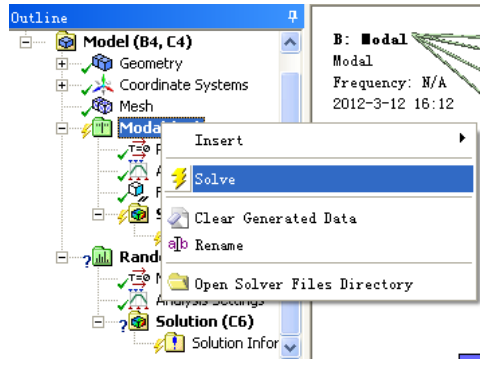


图 7-27　执行模态计算

10. 添加加速度谱

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Random Vibration（C5）选

项，此时会出现如图 7-28 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 PSD Base Excitation（基础激励响应分析）→PSD Acceleration（加速度谱激励）命令，如图 7-29 所示，此时在分析树中会出现 PSD Acceleration 选项。

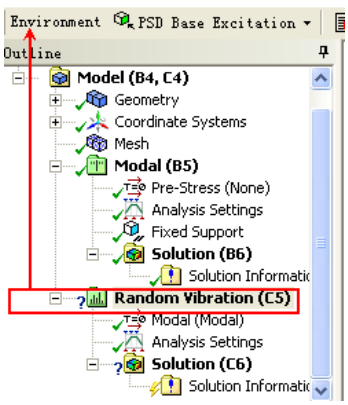


图 7-28　Environment 工具栏

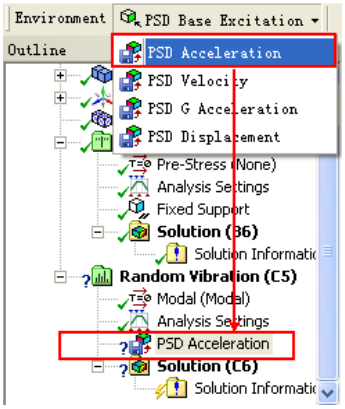


图 7-29　添加激励

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Random Vibration（C5）→PSD Acceleration（加速度谱激励）命令，在下面出现的如图 7-30 所示的 Details of “PSD Acceleration”面板中做如下更改。

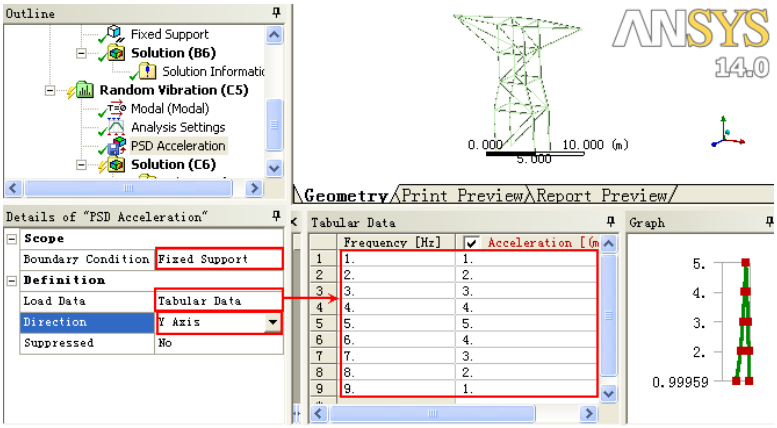


图 7-30　PSD Acceleration 面板

① 在 Scope→Boundary Condition 中选择 Fixed Supports 选项。

② 在 Definition→Load Data 中选择 Tabular Data 选项，然后在右侧的 Tabular Data 表格中填入表 7-1 中的数据。

表 7-1　加速度值表

	Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]		Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]
1	1	1	6	6	4.
2	2	2	7	7	3

续表

	Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]		Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]
3	3	3	8	8	2.
4	4	4	9	9	1
5	5	5			

Step4：在 Outline（分析树）中的 Random Vibration（C5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。如图 7-31 所示。

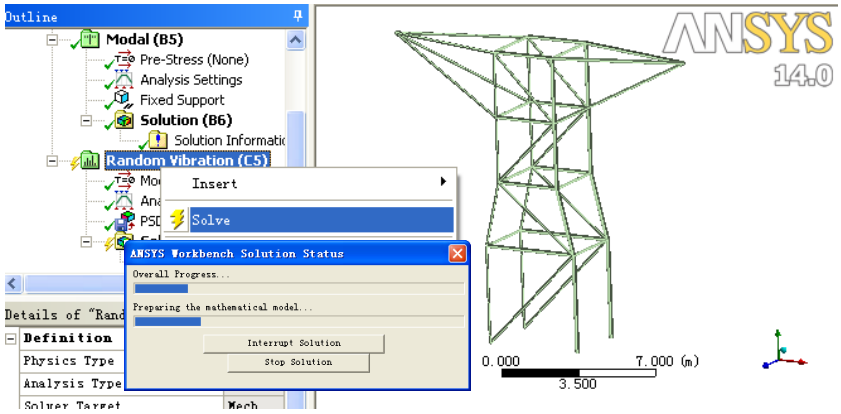


图 7-31　计算求解

11. 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项，此时会出现如图 7-32 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Directional 命令，如图 7-33 所示，此时在分析树中会出现 Directional Deformation 选项。

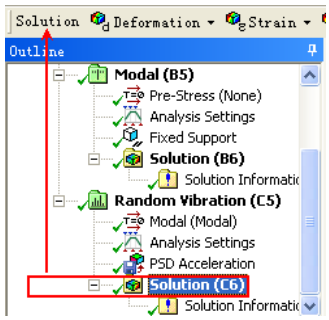


图 7-32　Solution 工具栏

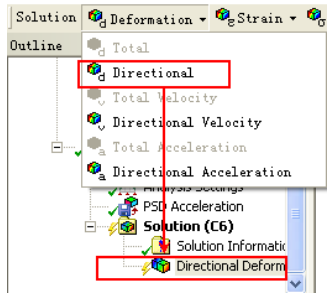


图 7-33　添加变形选项

Step3：如图 7-34 所示，右击 Solution 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，此时开始进行后处理计算。

Step4：图 7-35 所示为塔架随机振动变形云图。

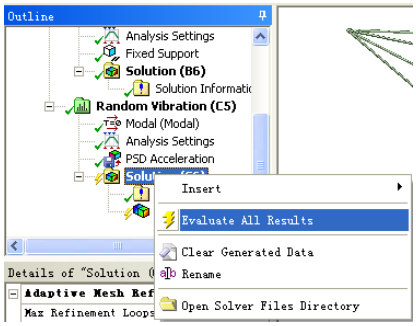


图 7-34　快捷菜单

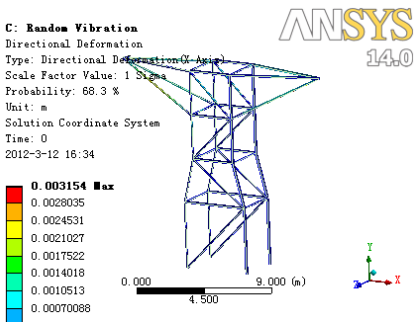


图 7-35　变形

12. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 7-36 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

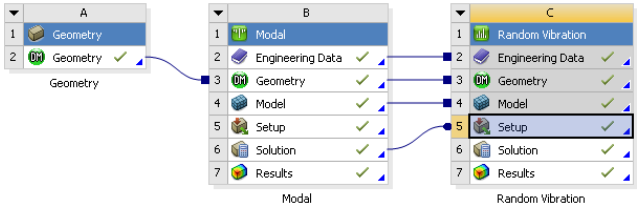


图 7-36　项目管理区中的分析项目

7.3　项目案例 2——弹簧随机振动分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的随机振动学分析模块，计算带接触设置实体的随机振动响应。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 带接触设置的随机振动学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ extension_spring.x_t
结果文件	光盘\example\ Spring_Random_Vibration.wbpj

1. 问题描述

如图 7-37 所示为某实体弹簧模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算弹簧模型在自重加速度作用下的位移响应情况。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 7-38 所示。

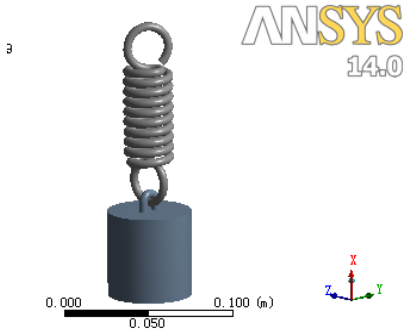


图 7-37　弹簧模型

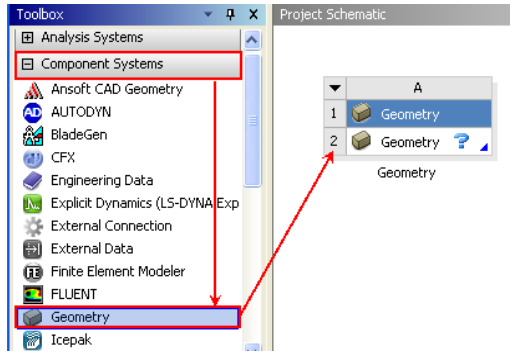


图 7-38　创建分析项目 A

3. 创建几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 7-39 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：选择文件路径，如图 7-40 所示，选择文件 extension_spring.x_t，并单击“打开”按钮。

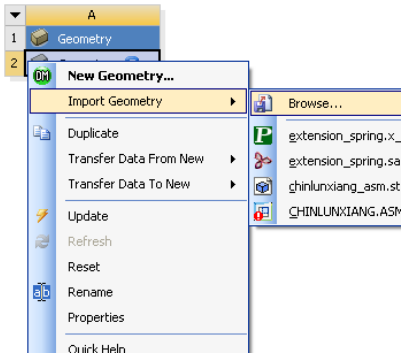


图 7-39　导入几何体

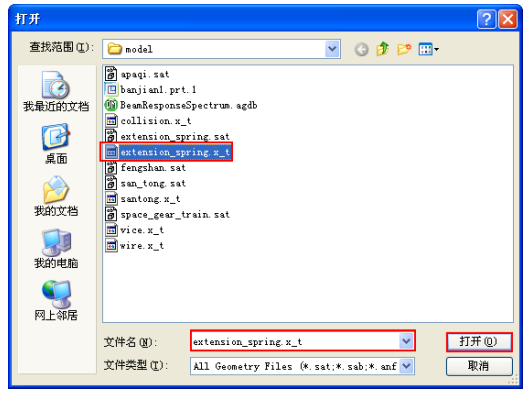


图 7-40　选择文件

Step3：双击项目 A 中的 A2（Geometry）选项，此时会加载 DesignModeler，设置单位为 mm，关闭“单位设置”对话框，如图 7-41 所示，单击工具栏中的 Generate 按钮，生成弹簧几何实体。

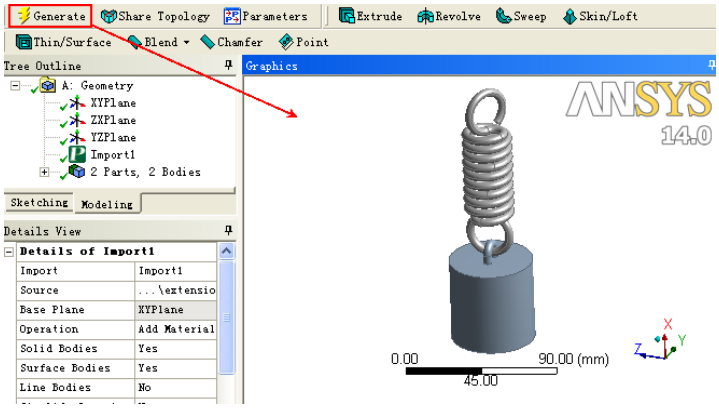


图 7-41　生成几何实体

Step4：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。

4. 模态分析

选择主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Modal（模态分析）命令，如图 7-42 所示，然后将鼠标移动到项目 A 的 A2（Geometry）中，此时在项目 A 的右侧出现一个项目 B，项目 A 与项目 B 的几何数据实现共享。

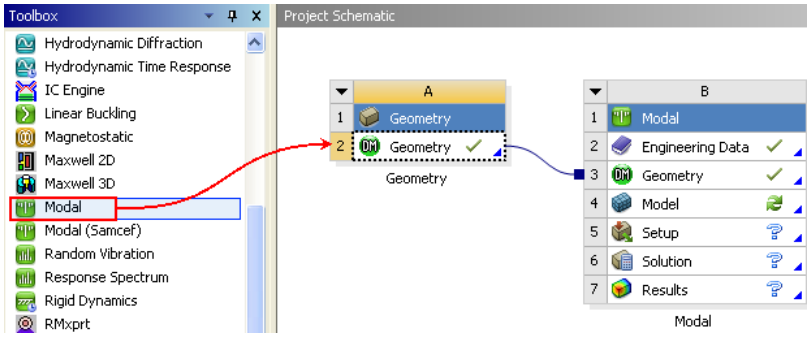


图 7-42　创建模态分析

5. 模态分析前处理

Step1：双击项目 B 中的 B4（Model）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 7-43 所示。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Connections→Contacts→Contact Region 选项，在如图 7-44 所示的 Details of Contact Region 面板中做如下设置。

在 Definition→Type 中选择接触类型为 Bonded。

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 7-45 所示，在 Sizing 中的 Relevance Center 中选择 Fine 选项，其余采用默认设置。

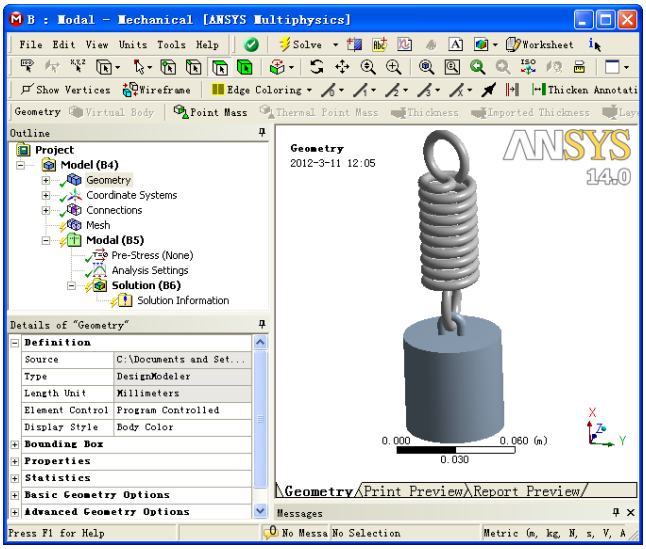


图 7-43　Mechanical 界面

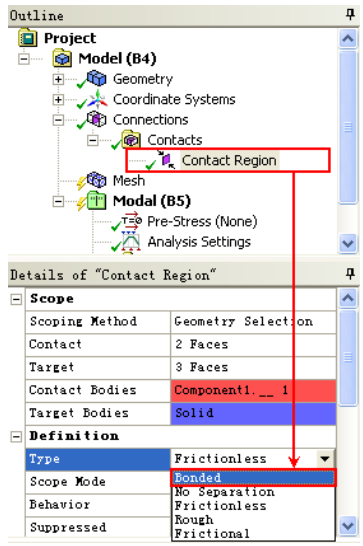


图 7-44　接触类型设置

Step4：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 7-46 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 7-47 所示。

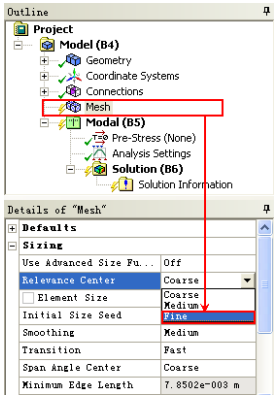


图 7-45　设置网格大小

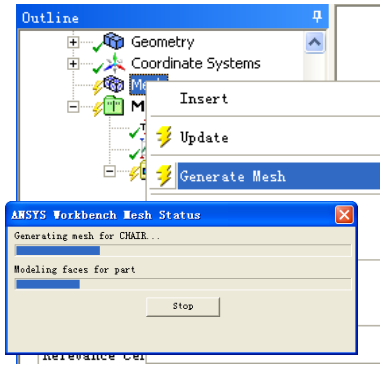


图 7-46　划分网格

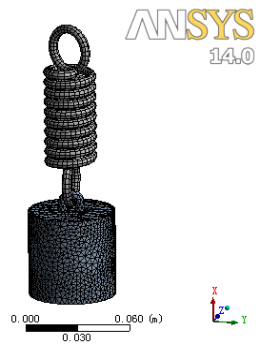


图 7-47　网格效果

6. 施加约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项，此时会出现如图 7-48 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 7-49 所示。

Step3：单击工具栏中的（选择面）按钮，然后选择工具栏中的按钮中的，使其变成（框选择）按钮，选择 Fixed Support 选项，选择实体单元的一端（位于 Z 轴最大值的一端），确保 Details of "Fixed Support"的 Geometry 栏中显示 2 Faces，表明上述两个面被选中，此时可在选中面上施加固定约束，如图 7-50 所示。

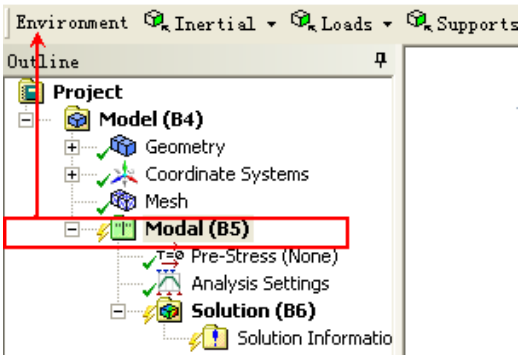


图 7-48　Environment 工具栏

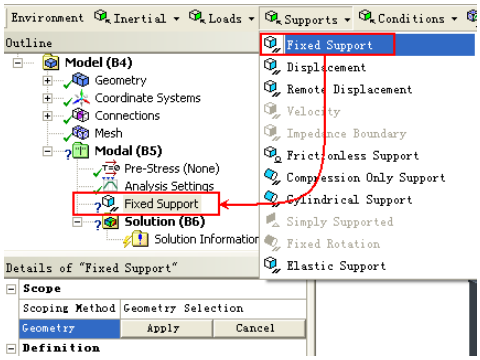


图 7-49　添加固定约束

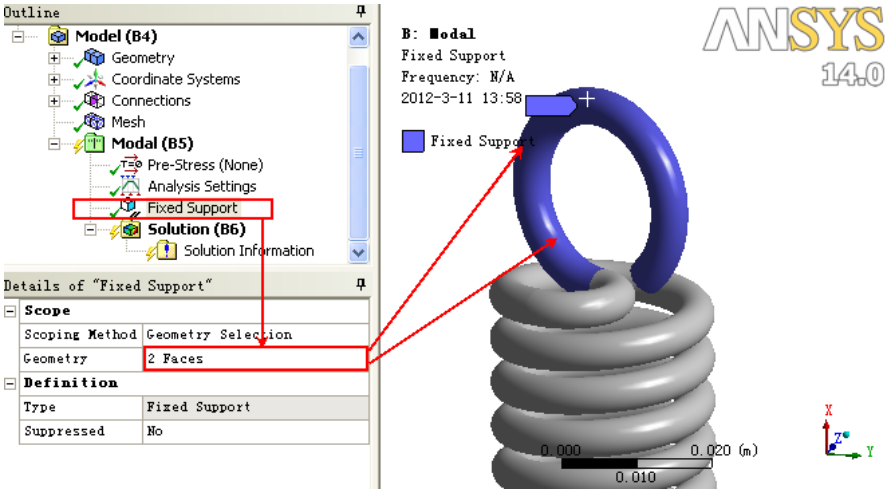


图 7-50　施加固定约束

Step4：在 Outline（分析树）中的 Modal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 7-51 所示。

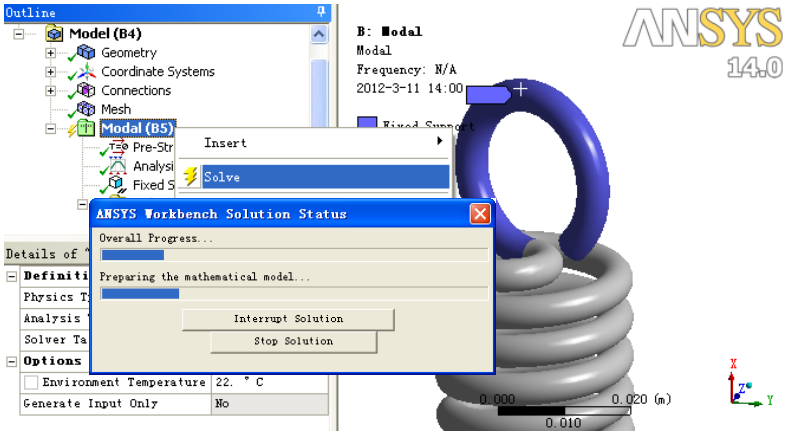


图 7-51　求解

7. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 7-52 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 7-53 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

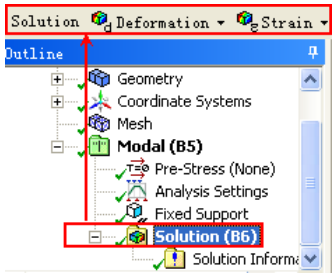


图 7-52　Solution 工具栏

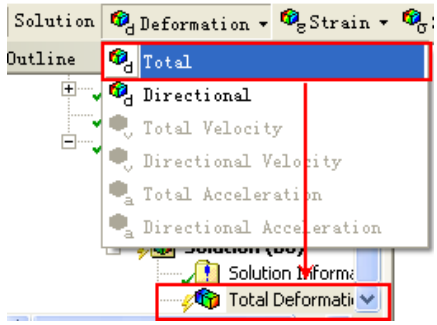


图 7-53　添加变形选项

Step3：如图 7-54 所示，右击 Solution 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，此时开始进行后处理计算。

Step4：图 7-55 所示为模型的一阶变形云图。

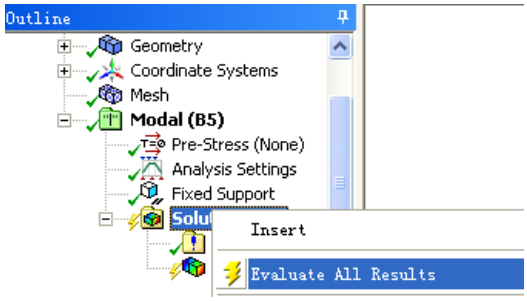


图 7-54　快捷菜单

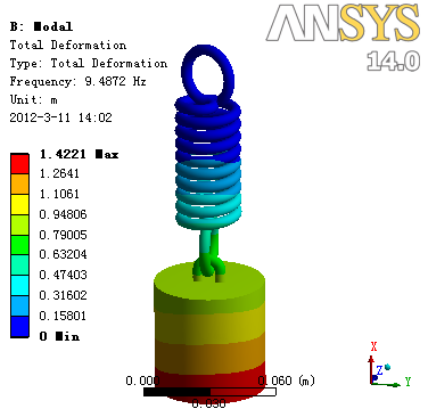


图 7-55　一阶变形

Step5：图 7-56 所示为模型的前六阶自振频率。

Step6：在 Modal（B5）下面的 Analysis Settings 中可以修改模态数量，图 7-57 所示为软件默认的计算前六阶模态。

8. 随机振动分析

Step1：回到 Workbench 主界面，如图 7-58 所示，选择 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Random Vibration（随机振动分析）命令不放，直接拖曳到项目 B（Modal）的 B6 中。

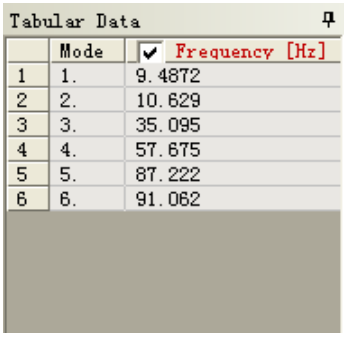


图 7-56　各阶模态频率

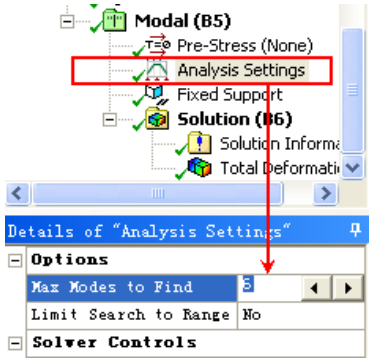


图 7-57　修改模态数量选项

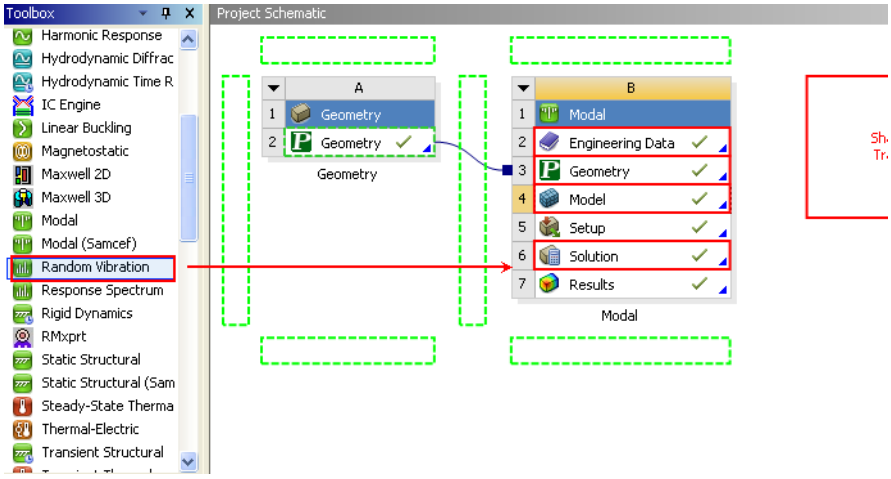


图 7-58　瞬态动力学分析

Step2：如图 7-59 所示，在项目 B 与项目 C 直接实现了数据共享，此时在项目 C 中的 C5（Setup）会出现 标识。

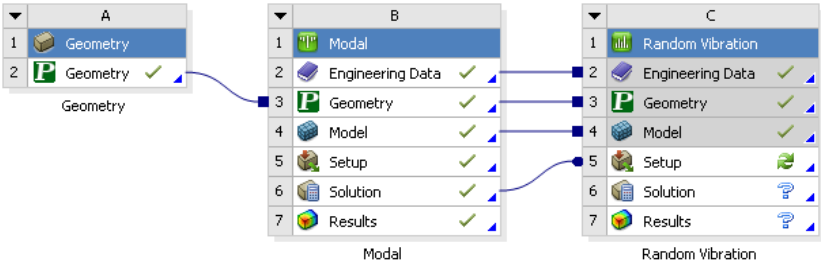


图 7-59　数据共享

Step3：双击如图 7-59 所示的 C5 栏，此时启动如图 7-60 所示的 Mechanical 平台。

Step4：右击如图 7-61 所示的 Modal 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，进行求解计算。

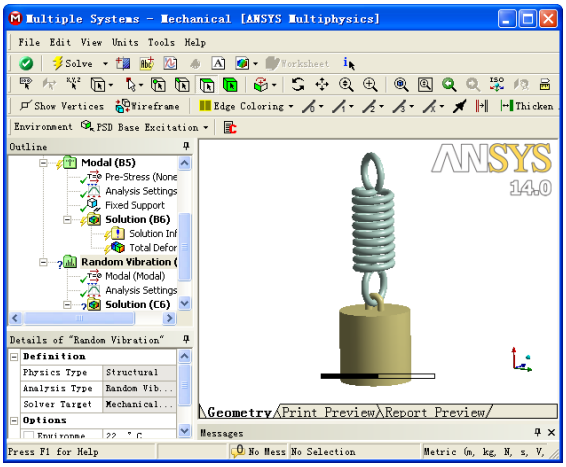


图 7-60　Mechanical 界面

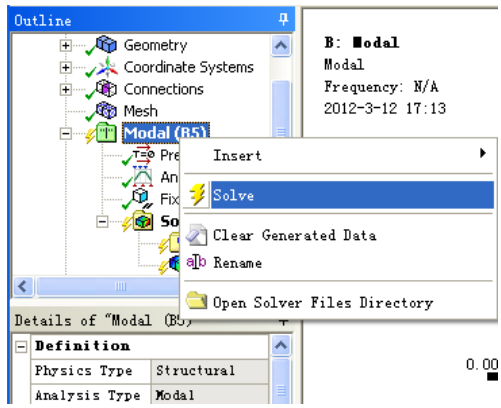


图 7-61　执行模态计算

9. 添加动态力载荷

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Random Vibration（C5）选项，此时会出现如图 7-62 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 PSD Base Excitation（基础激励响应分析）→ PSD G Acceleration 命令，如图 7-63 所示，此时在分析树中会出现 PSD G Acceleration 选项。

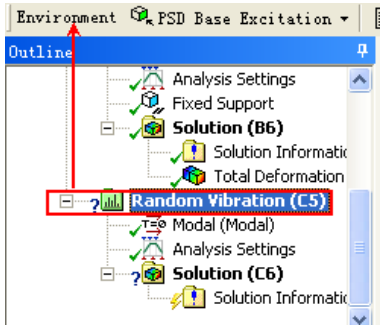


图 7-62　Environment 工具栏

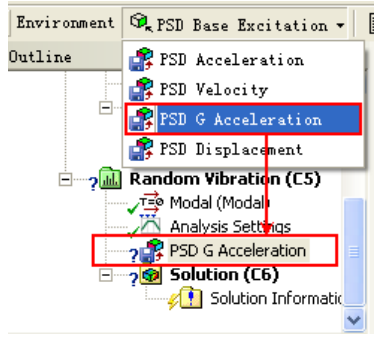


图 7-63　添加激励

Step3：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Random Vibration（C5）→ PSD Base Excitation 命令，在如图 7-64 所示的 Details of “PSD G Acceleration”面板中做如下更改。

① 在 Scope→Boundary Condition 中选择 Fixed Support 选项。

② 在 Load Data 中选择 Tabular Data 选项，然后将表 7-2 中的数值输入到右侧的表中。

③ 在 Direction 栏中选择 X Axis 选项。

表 7-2　加速度值表

	Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]		Frequency[Hz]	Acceleration[m/s^2]
1	10	0.98	6	60	0.16
2	20	0.49	7	70	0.14
3	30	0.33	8	80	0.12
4	40	0.25	9	90	0.11
5	50	0.20			

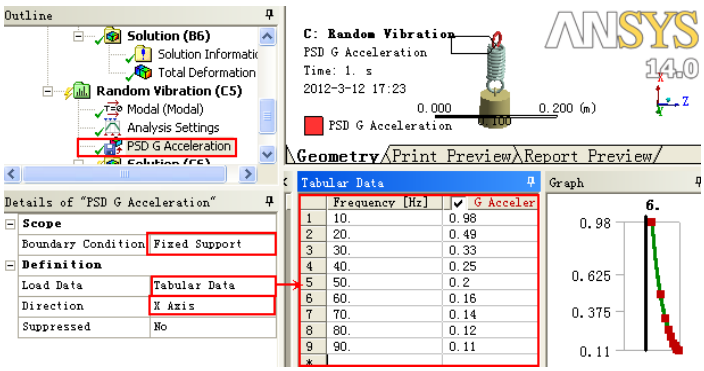


图 7-64　激励设置

Step4：如图 7-65 所示，在 Random Vibration（C5）选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

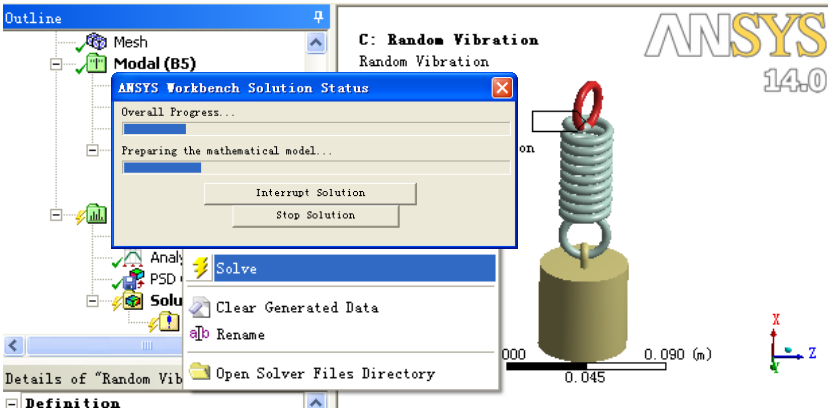


图 7-65　计算求解

10. 后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（C6）选项，此时会出现如图 7-66 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 7-67 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation 选项。

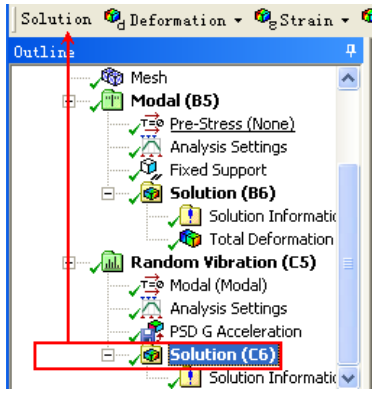


图 7-66　Solution 工具栏

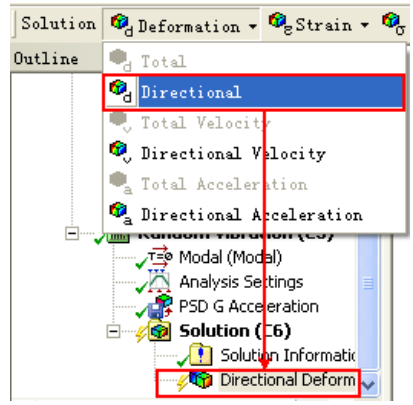


图 7-67　添加变形选项

Step3：如图 7-68 所示，右击 Solution 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，此时开始进行后处理计算。

Step4：图 7-69 所示为模型随机振动的 1σ 变形云图。

Step5：图 7-70 所示为模型随机振动的 2σ 变形云图。

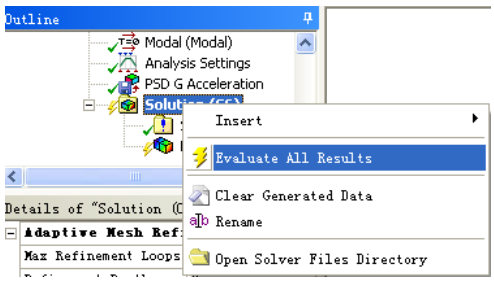


图 7-68　快捷菜单

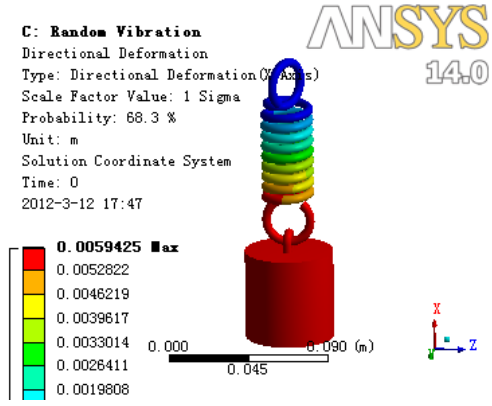


图 7-69　1σ 变形云图

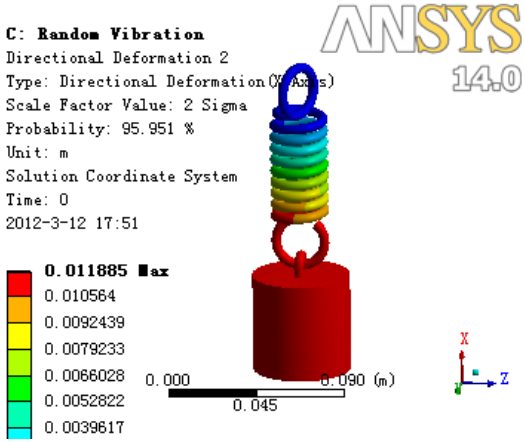


图 7-70　2σ 变形云图

11. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 7-71 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 Spring_Random_Vibration。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

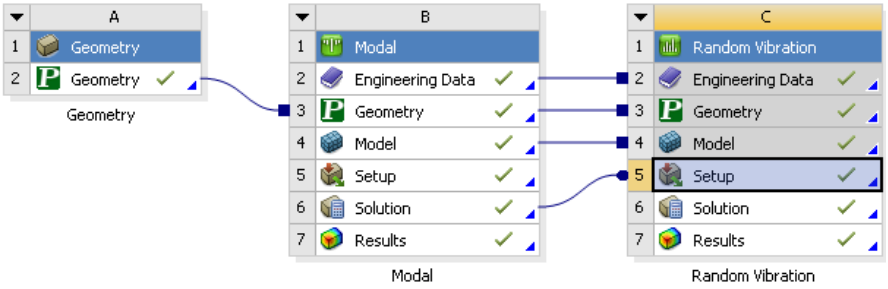


图 7-71　项目管理区中的分析项目

7.4 本章小结

本章节用了两个典型案例详细介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件的随机振动分析模块，包括随机振动分析的建模方法、网格划分、边界条件的施加。

通过本章节的学习，读者应该对随机振动分析的过程有了详细的了解。

第 8 章

显示动力学分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的显示动力学分析模块进行详细讲解，并通过两个典型案例对显示动力学分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件显示动力学分析的过程。

（2）了解显示动力学分析与其他分析的不同之处。

（3）了解显示动力学分析的应用场合。

8.1 显示动力学分析简介

当数值仿真问题涉及瞬态、大应变、大变形、材料的破坏，材料的完全失效或者伴随复杂接触的结构问题时，通过 ANSYS 显式动力学求解可以满足客户的需求。

ANSYS 显示动力学分析包括以下三种求解器：ANSYS Explicit STR2、ANSYS AUTODYN 及 ANSYS LS-DYNA。

1. ANSYS Explicit STR2

基于 ANSYS AUTODYN 分析程序的稳定、成熟的拉格朗日（结构）求解器的 ANSYS Explicit STR 软件已经完全集成到统一的 ANSYS Workbench 环境中。在 ANSYS Workbench 平台环境中，可以方便、无缝地完成多物理场分析，包括电磁、热、结构和计算流体动力学（CFD）的分析。

ANSYS Explicit STR 扩展了功能强大的 ANSYS mechanical 系列软件分析问题的范围，这些问题往往涉及复杂的载荷工况、复杂的接触方式，例如，抗冲击设计、跌落试验（电子和消费产品）；低速-高速的碰撞问题分析（从运动器件分析到航空航天应用）；高度非线性塑性变形分析（制造加工）；复杂材料失效分析应用（国防和安全应用）；破坏接触，如胶粘或焊接（电子和汽车工业）。

2. ANSYS AUTODYN

ANSYS AUTODYN 软件是一个功能强大的用来解决固体、流体、气体及相互作用的高度非线性动力学问题的显式分析模块。该软件不仅计算稳健、使用方便，而且还提供很多高级功能。

与其他显式动力学软件相比，ANSYS AUTODYN 软件具有易学、易用、直观、方便、交互式图形界面的特性。

采用 ANSYS AUTODYN 进行仿真分析可以大大降低工作量，提高工作效率和降低劳动成本。通过自动定义接触和流固耦合界面，以及默认的参数可以大大节约时间和降低工作量。

ANSYS AUTODYN 提供如下求解技术。

- 有限元法，用于计算结构动力学（FE）。
- 有限体积法，用于快速瞬态计算流体动力学（CFD）。
- 无网格粒子法，用于高速、大变形和碎裂（SPH）。
- 多求解器耦合，用于多种物理现象耦合情况下的求解。
- 丰富的材料模型，包括材料本构响应和热力学计算。
- 串行计算和共享内存式和分布式并行计算。

ANSYS Workbench 平台提供了一个有效的仿真驱动产品开发环境。

- CAD 双向驱动。
- 显式分析网格的自动生成。
- 自动接触面探测。
- 参数驱动优化。
- 仿真计算报告的全面生成。
- 通过 ANSYS DesignModeler 实现几何建模、修复和清理。

3. ANSYS LS-DYNA

ANSYS LS-DYNA 软件为功能成熟、输入要求复杂的程序，提供方便、实用的接口技术来连接有多年应用实践的显式动力学求解器。1996 年一经推出，ANSYS LS-DYNA 就帮助众多行业的客户解决了诸多复杂的设计问题。

在经典的 ANSYS 参数化设计语言（APDL）环境中，ANSYS Mechanical 软件的用户早已可以进行显式分析求解。

最近，采用 ANSYS Workbench 强大和完整的 CAD 双向驱动工具、几何清理工具、自动划分与丰富的网格划分工具来完成 ANSYS LS-DYNA 分析中初始条件、边界条件的方便快速定义。

显式动力学计算充分利用 ANSYS Workbench 功能特点生成 ANSYS LS-DYNA 求解计算用的关键字输入文件（.k），另外，安装程序中包含 LS-PrePost，提供对显式动力学仿真结果进行专业后处理的功能。

8.2 项目案例 1——钢钉受力显示动力学分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的显示动力学分析模块，计算钢钉在 10 000N 力作用下穿入钢板及位移、应变云图。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 显示动力学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ asmdingmu.sat
结果文件	光盘\example\ Ding_Explicit.wbpj

1. 问题描述

如图 8-1 所示为某实体梁模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算钢钉 10 000N 的力作用下的位移及应变云图。

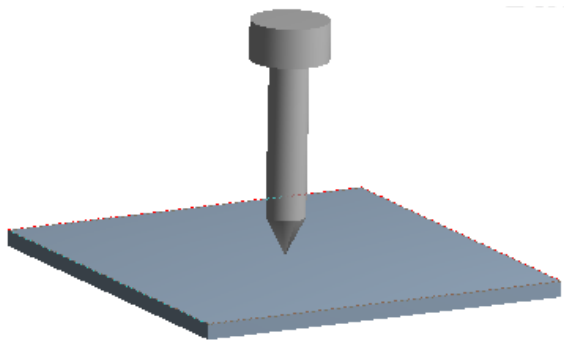


图 8-1　实体梁模型

2. 启动 Creo Parametric 1.0

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→PTC Creo →Creo Parametric 1.0 命令，启动 Creo Parametric 1.0，进入主界面。

Step2：单击工具栏中的按钮，在弹出的如图 8-2 所示的“文件打开”对话框中做如下操作：

① 在“文件打开”对话框中的下侧类型中选择 ACIS 文件（*.sat）格式。

② 在模型文件夹中选择 amsdingmu.sat 文件，单击“打开”按钮。

注：以上过程为演示用 Creo（Pro/e）软件打开几何文件步骤，读者可以直接略去此步骤。

Step3：此时弹出如图 8-3 所示的模型设置，这里用缺省（默认）全部，单击“确定”按钮。

Step4：此时，几何模型文件会显示在 Creo 软件中，如图 8-4 所示。

注：根据几何模型文件的大小，读入文件的时间有所不同。

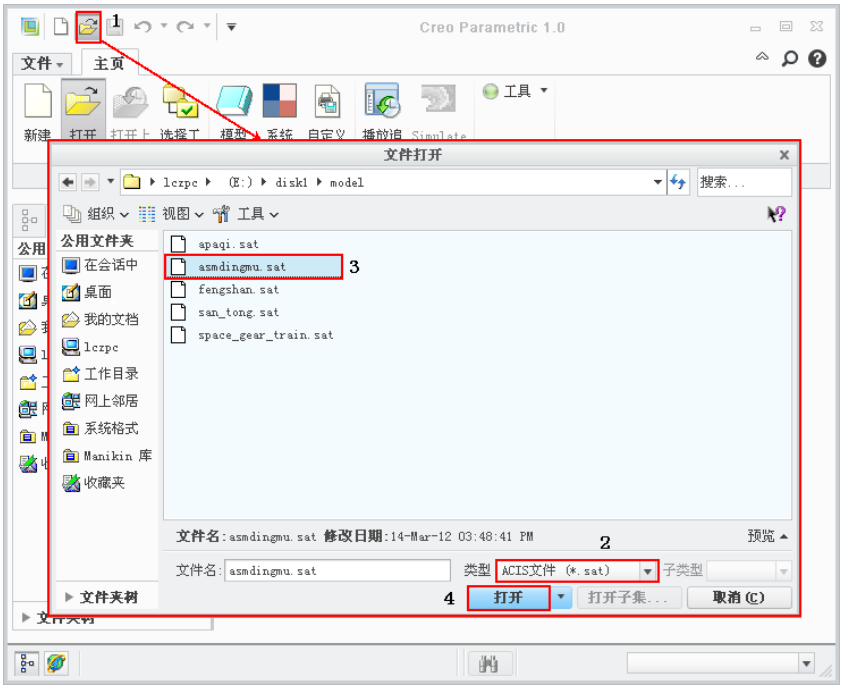


图 8-2　读入几何文件



图 8-3　模型设置

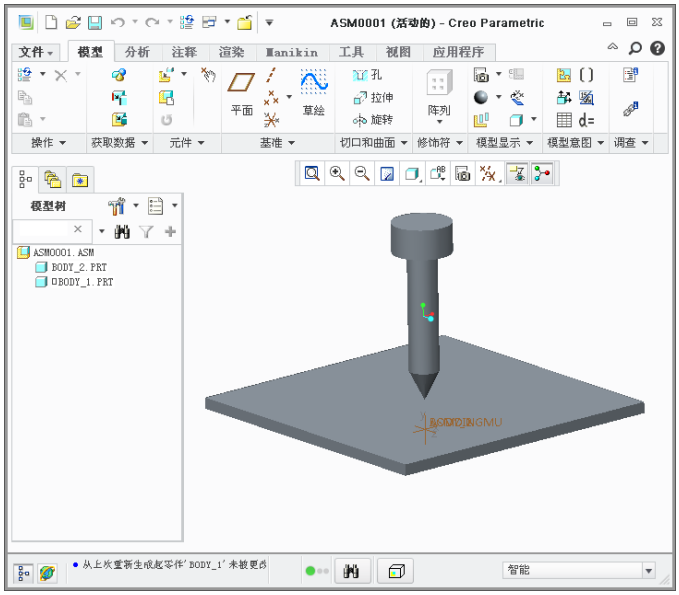


图 8-4　Creo 界面

Step5：如图 8-5 所示，单击工具栏中的按钮，在弹出的“保存对象”对话框中单击“确定”按钮，默认文件名称为 ASM0001.asm。

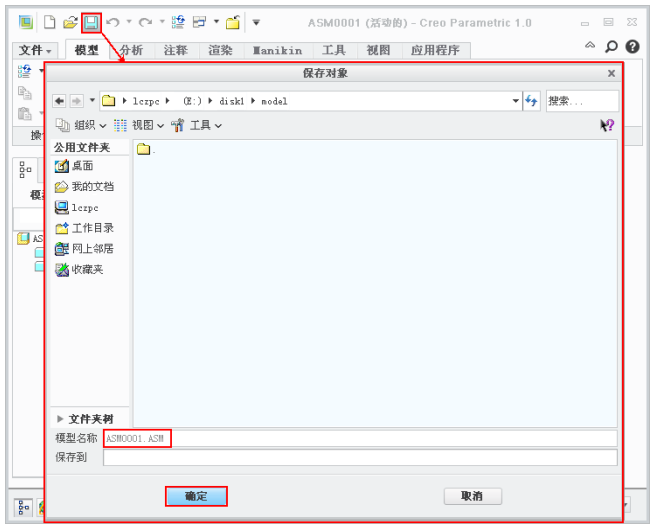


图 8-5　保存文件

Step6：选择工具栏中的“工具”→“工具”→ANSYS14.0→Workbench 命令，如图 8-6 所示，此时会弹出 ANSYS Workbench 14.0 软件。

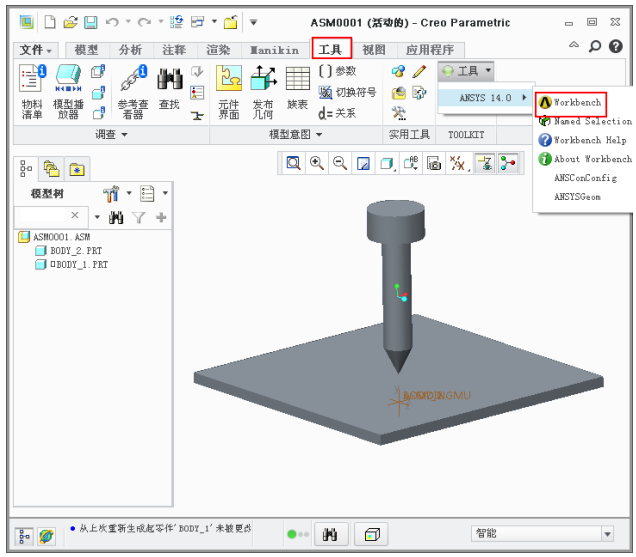


图 8-6　启动 Workbench

3. 启动 Workbench 建立项目

Step1：Workbench 软件启动后，自动创建项目 A（Geometry），如图 8-7 所示。

Step2：如图 8-8 所示，双击项目 A 中的 A2（Geometry）选项，启动 DesignModeler 平台，设置单位为 mm，然后关闭“单位设置”对话框。

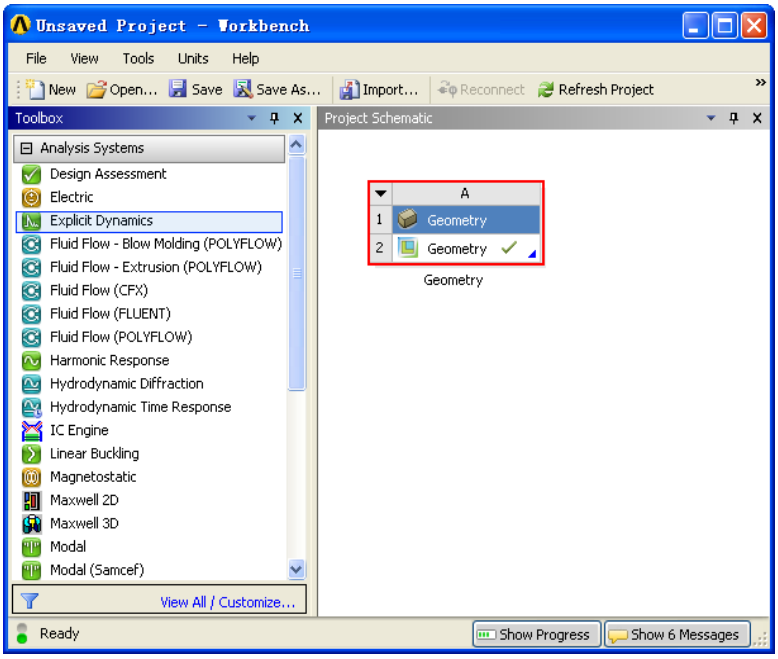


图 8-7　创建项目 A

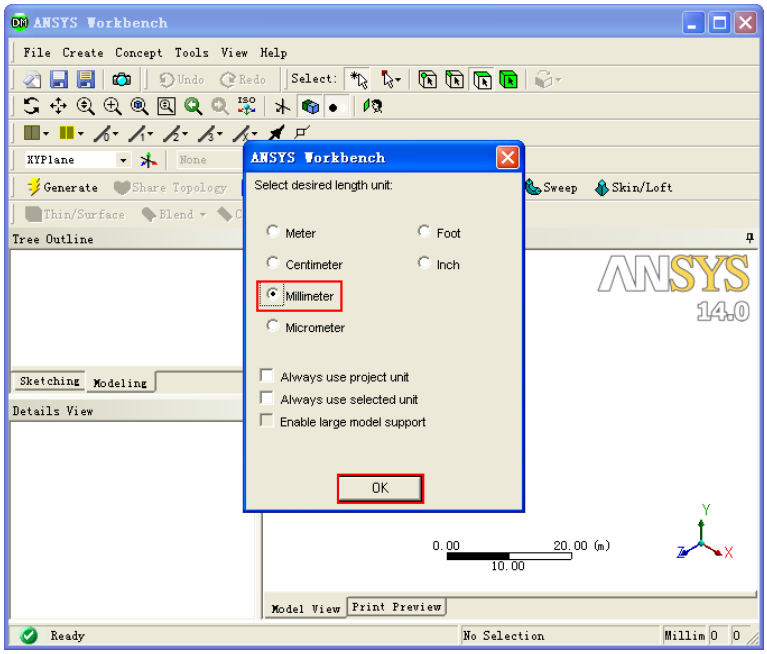


图 8-8　启动 DesignModeler

Step3：如图 8-9 所示，单击工具栏中的 Generate 按钮，在图形区域显示几何图形。

Step4：单击按钮关闭 DesignModeler 平台。

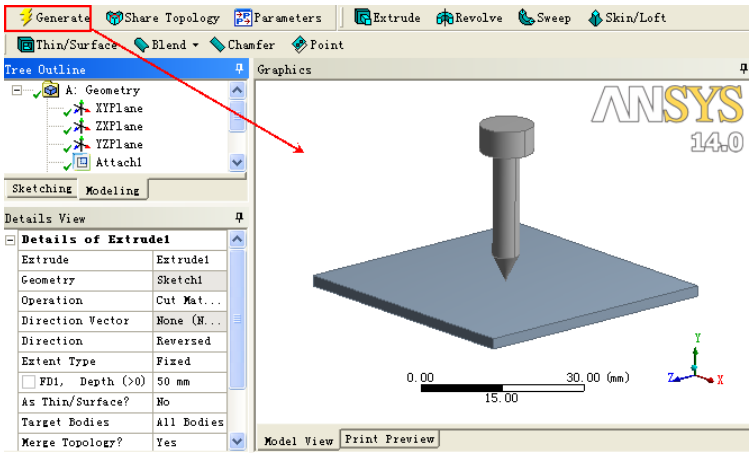


图 8-9　几何数据

4. 显示动力学分析

Step1：如图 8-10 所示，将工具箱（Toolbox）中的 Explicit Dynamics（显示动力学分析）选项直接拖曳到项目 A 中的 A2（Geometry）中。

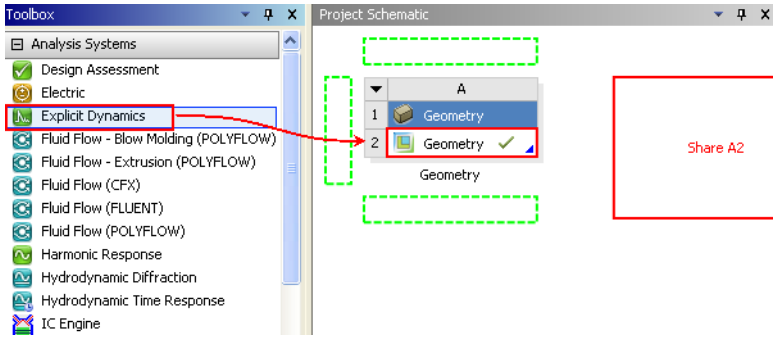


图 8-10　创建项目 B

Step2：此时创建了项目 B（Explicit Dynamics）显示动力学分析模块，如图 8-11 所示。

Step3：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。

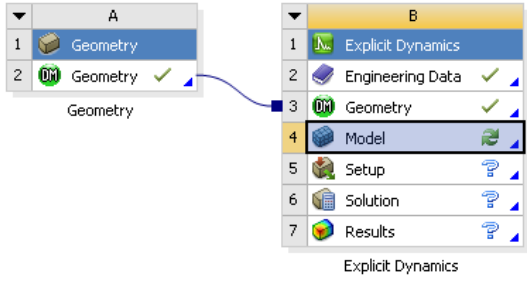


图 8-11　项目 B

5. 材料选择与赋予

Step1：双击项目 B 中的 B2（Engineering Data）工程数据选项，此时在弹出的工程数据管理器的工具栏中单击按钮，如图 8-12 所示，在 Engineering Data Sources（工程数据源）中选择 Explicit Materials（显示分析材料库）选项，然后在 Outline of Explicit Materials（显示分析材料列表）中 STEEL4340 和 CART BRASS 两种材料后面的按钮上面单击，选中两种材料。

注：如果材料被选中，则在响应的材料名称后面出现图标。

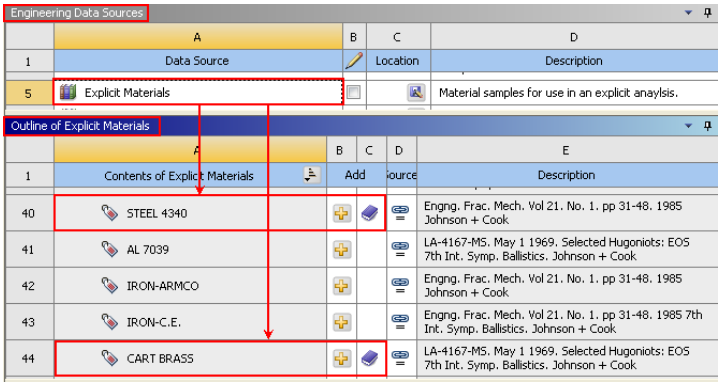


图 8-12　材料选择

Step2：单击工具栏中的Return to Project按钮退出材料库。

6. 建立项目分析

Step1：双击项目 B 中的 B4（Model）选项，进入如图 8-13 所示的 Mechanical 平台，在该界面下即可进行材料赋予、网格划分，模型计算与后处理等工作。

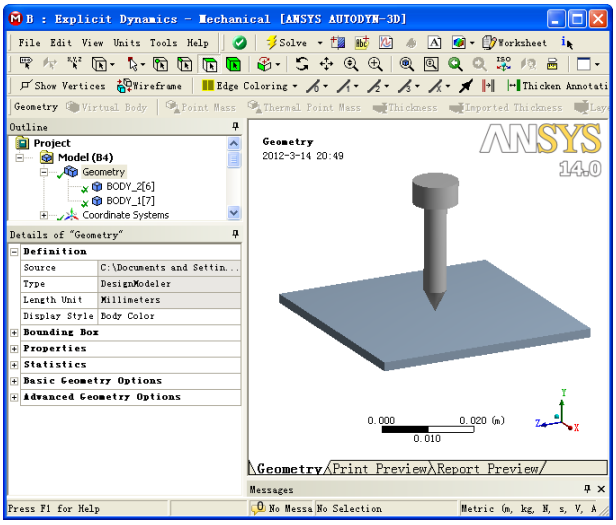


图 8-13　Mechanical 平台

Step2：如图 8-14 所示，在 Outline 中选择 Model（B4）→Geometry→BODY_2[6]命令，在 Details of BODY_2[6]面板中的 Material→Assignment 中选择 CART BRASS 材料。

Step3：如图 8-15 所示，按上述步骤将 STEEL 4340 材料赋予 BODY_1[7]。

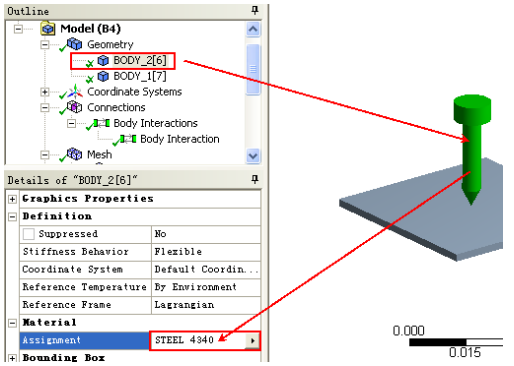


图 8-14　材料赋予（1）

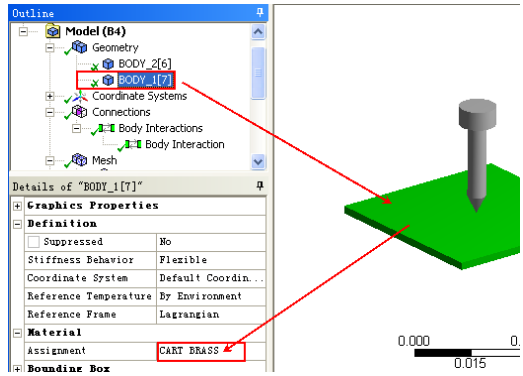


图 8-15　材料赋予（2）

7. 分析前处理

Step1：如图 8-16 所示，两个几何实体已经被程序自动设置好连接，本例按默认即可。

Step2：如图 8-17 所示，右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Sizing 命令。

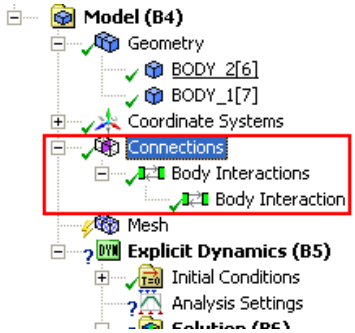


图 8-16　Mechanical 界面

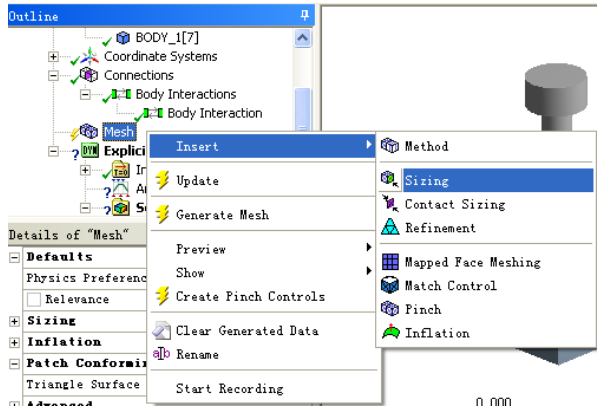


图 8-17　赋予材料属性

Step3：选择 Sizing 命令使其加亮，在 Details of “Mesh”（参数列表）面板中做如图 8-18 所示的设置。

① 在 Scope→Geometry 中确定图形中下面的方板被选中。

② 在 Definition→Type 中选择 Sphere of Influence 选项。

③ 在 Sphere Center 中选择 Global Coordinate System 选项。

④ 在 Sphere Radius 中输入数值 1.e-003m。

⑤ 在 Element Size 中输入数值 1.e-003m，完成网格划分设定。

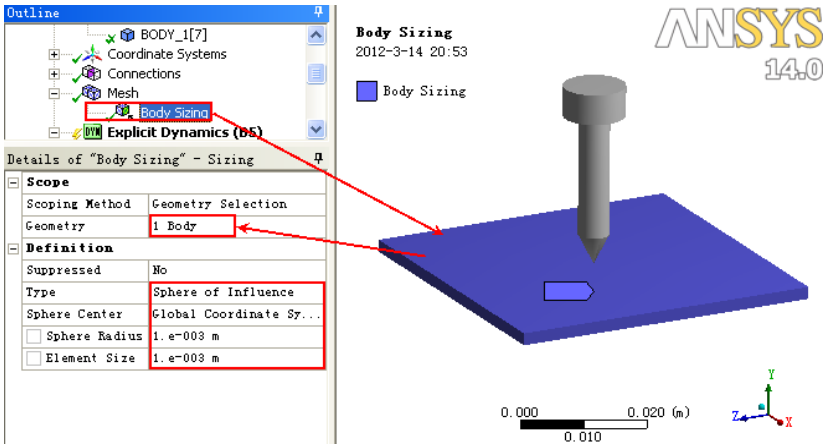


图 8-18　设置网格大小

Step4：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 8-19 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 8-20 所示。

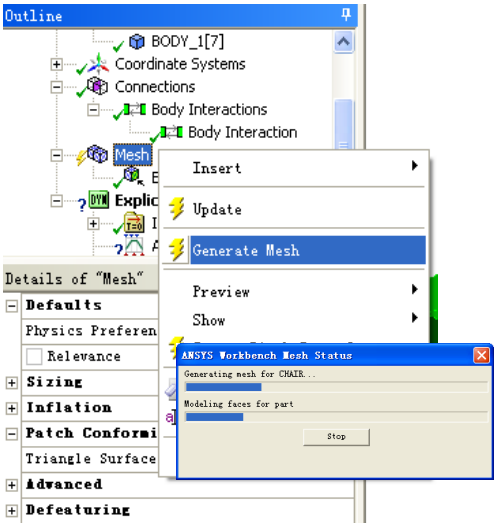


图 8-19　划分网格

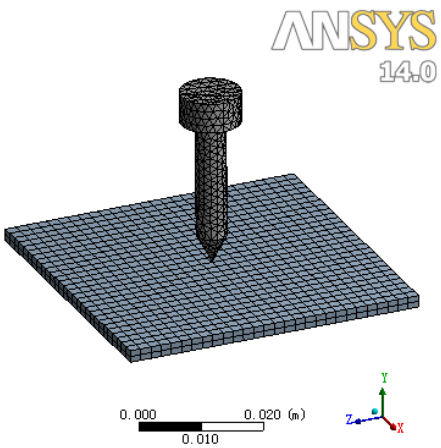


图 8-20　网格效果

8. 施加载荷

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamics（B5）选项，此时会出现如图 8-21 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Loads（约束）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 8-22 所示。

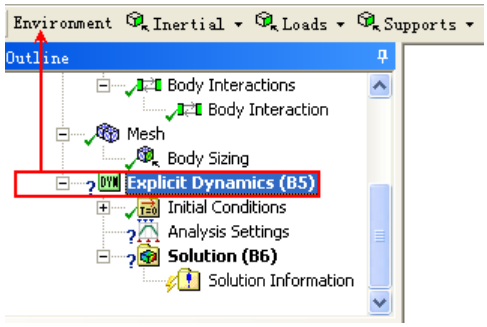


图 8-21　Environment 工具栏

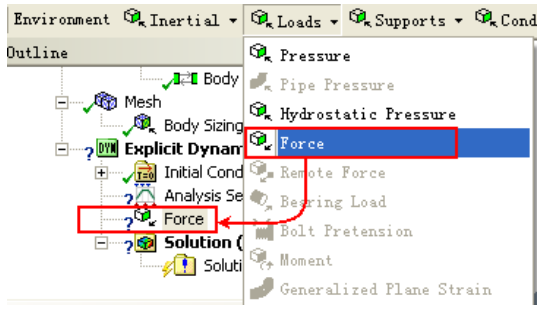


图 8-22　添加力

Step3：单击工具栏中的（选择面）按钮，钢钉最上端（位于 *Y* 轴最大值的一端），确保 Details of “Force”的 Geometry 栏中出现 1 Face，表明钉子的上端面被选中，在 Magnitude 栏中输入−10 000N，如图 8-23 所示。

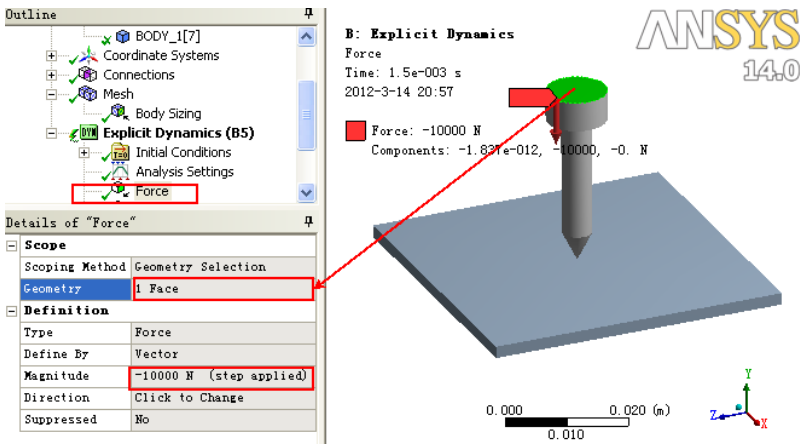


图 8-23　施加固定约束

Step4：选择 Explicit Dynamics（B5）下面的 Analysis Settings 选项，在出现的 Details of “Analysis Settings’面板中的 End Time 输入 1.5e-003s，如图 8-24 所示。

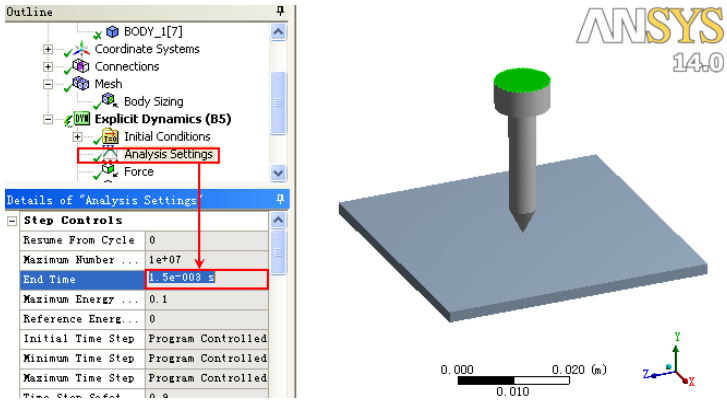


图 8-24　设定时间

Step5：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamics（B5）选项，在出现的 Environment 工具栏中选择如图 8-25 所示的 Fixed Support 命令。

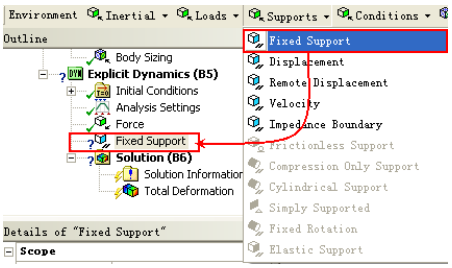


图 8-25　添加约束命令

Step6：单击工具栏中的（选择线）按钮，然后选择长方体的四个侧面，操作如图 8-26 所示。

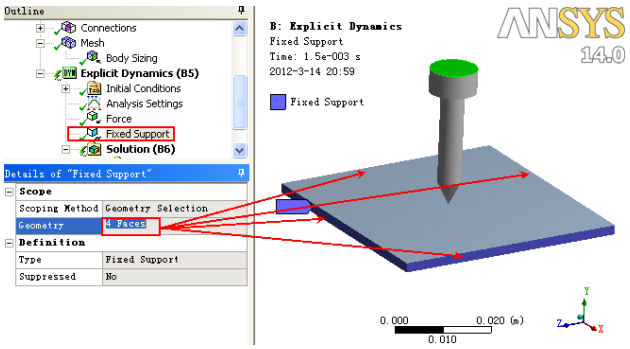


图 8-26　设置约束

Step7：在 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamics（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 8-27 所示。

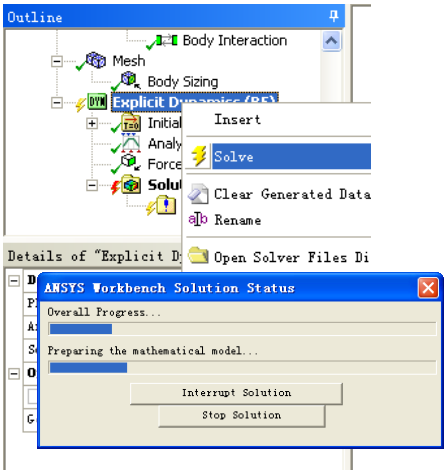


图 8-27　求解

9. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 8-28 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 8-29 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

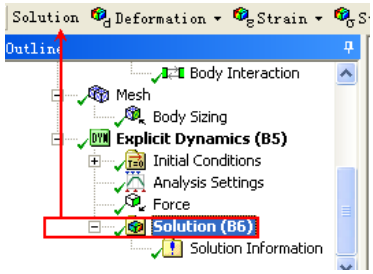


图 8-28　Solution 工具栏

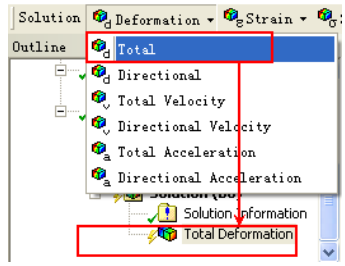


图 8-29　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 8-30 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 8-31 所示的一阶模态总变形分析云图。

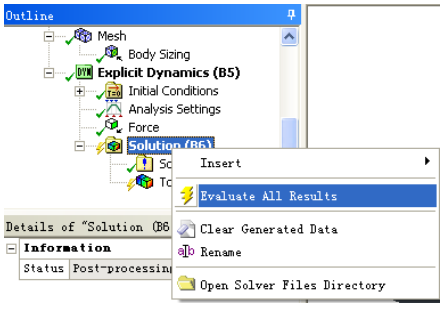


图 8-30　后处理（一）

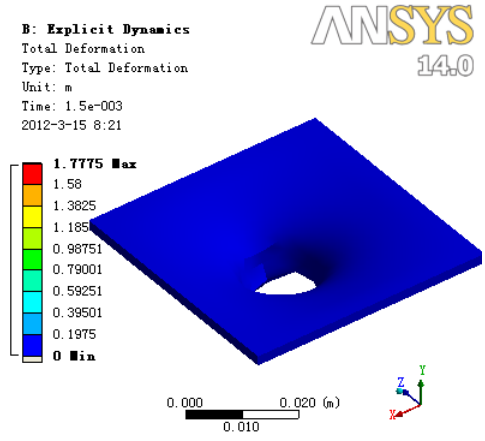


图 8-31　变形

Step5：选择 Solution 工具栏中的 Strains（应变）→Equivalent（von Mises）（等效应变）命令，如图 8-32 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent（von Mises）（等效应变）选项。

Step6：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 8-33 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

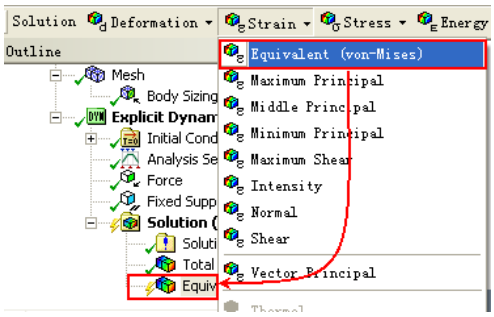


图 8-32　添加应变

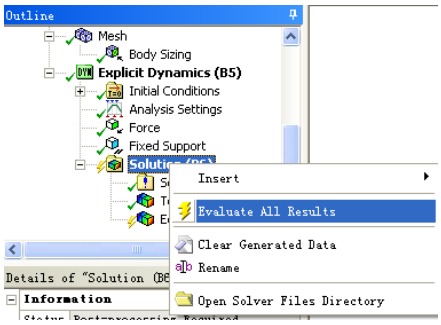


图 8-33　后处理（二）

Step7：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Equivalent（von-Mises）（等效应变）命令，此时会出现如图 8-34 所示的应变分布云图。

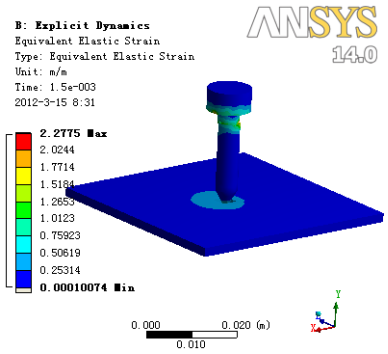


图 8-34　后处理（三）

10. 保存与退出

Step1：选择 Mechanical 的 File→Save Project 命令，如图 8-35 所示，此时会弹出“另存为”对话框。

Step2：如图 8-36 所示，在弹出的“另存为”对话框中输入文件名为 Ding_Explicit。

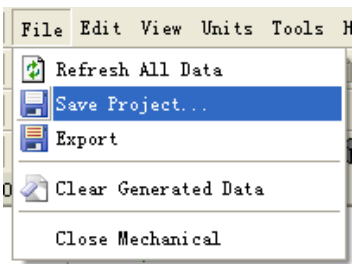


图 8-35　菜单栏

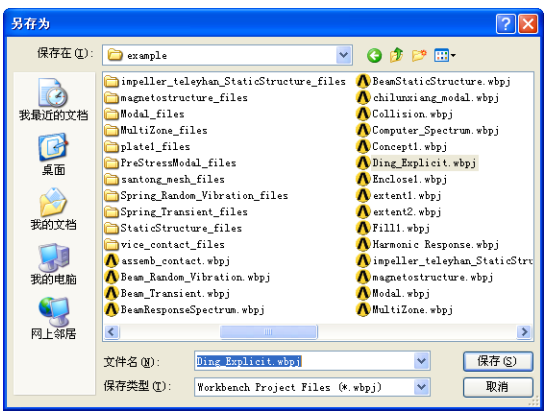


图 8-36　“另存为”对话框

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，如图 8-37 所示，完成项目分析。

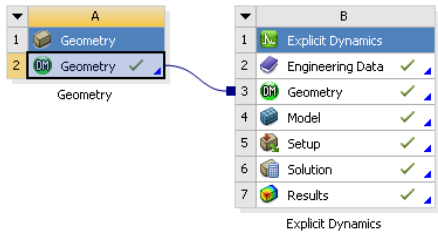


图 8-37　项目管理区中的分析项目

8.3　项目案例 2——钢板成型显示动力学分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的显示动力学分析模块，计算薄壁金属板在挤压成型过程中的位移、应力计应变云图。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 显示动力学分析中挤压成型分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\ jiyachengxing.sat
结果文件	光盘\example\jiyachengxing.wbpj

1. 问题描述

如图 8-38 所示为某板型材和模具几何模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算板型材被模具挤压成型的过程。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Explicit Dynamics（显示动力学分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 8-39 所示。

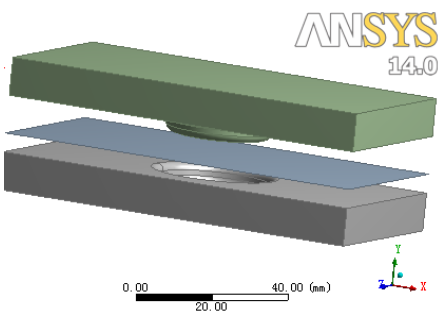


图 8-38　板型材与模具模型

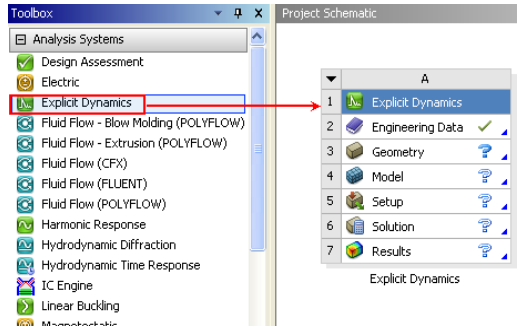


图 8-39　创建分析项目 A

3. 导入几何模型

Step1：在 A3 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 8-40 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：选择文件路径，如图 8-41 所示，选择文件 jiyachengxing.sat，并单击“打开”按钮。

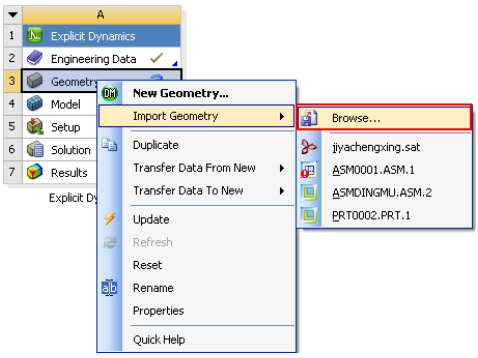


图 8-40　导入几何体

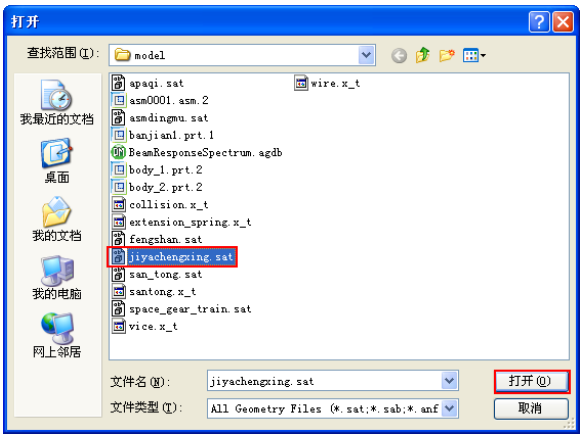


图 8-41　选择文件

Step3：双击项目 A 中的 A3（Geometry）选项，此时会加载 DesignModeler，设置单位为 mm，关闭“单位设置”对话框。单击工具栏中的 Generate 按钮，生成几何模型，如图 8-42 所示。

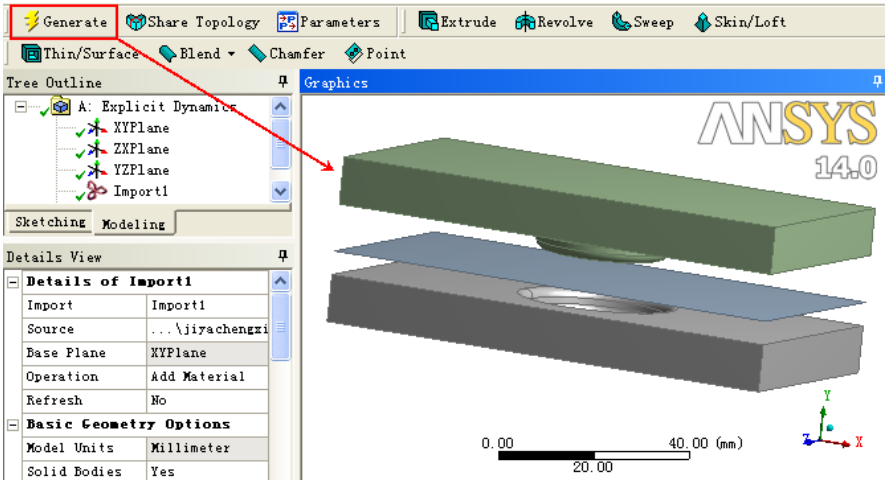


图 8-42　生成几何

Step4：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。

4. 材料选择

Step1：双击项目 A 中的 A2（Engineering Data）选项，此时会出现如图 8-43 所示的材料列表。

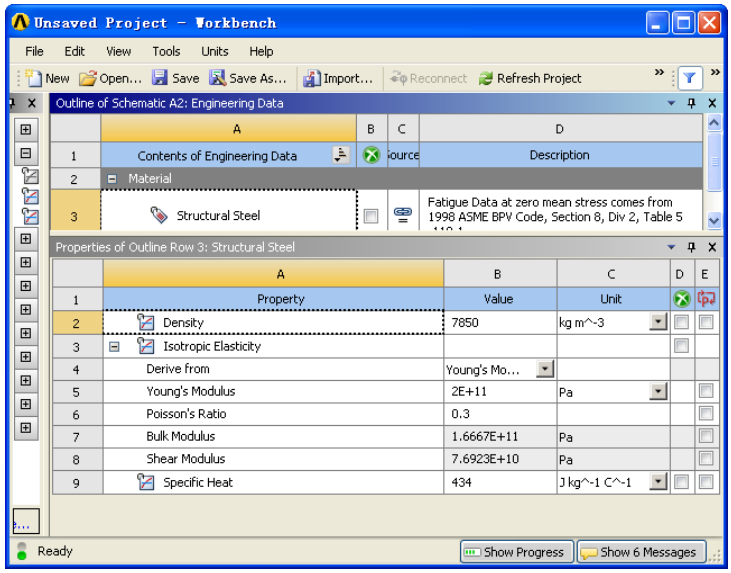


图 8-43　材料列表

Step2：单击工具栏中的按钮，进入如图 8-44 所示的材料库。

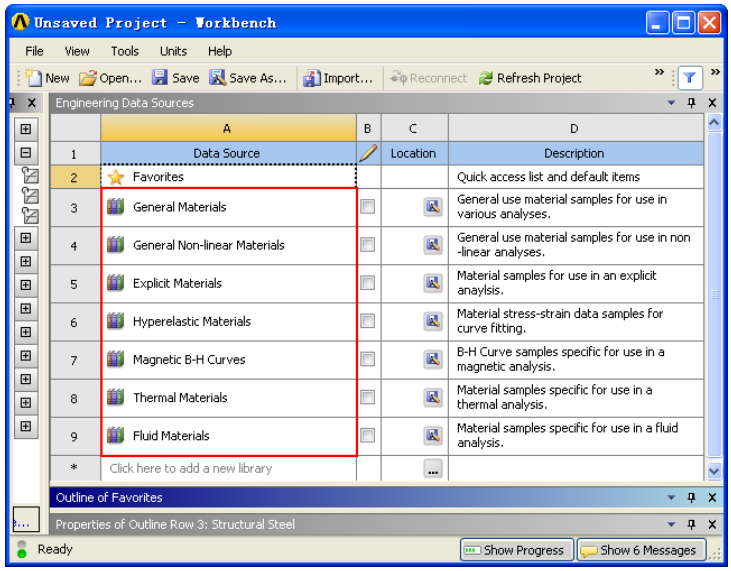


图 8-44　材料库

Step3：如图 8-45 所示，在材料库中选择 Explicit Materials（显示分析材料库）选项，在 Outline of Explicit Materials 中选择 STEEL 4340 材料。

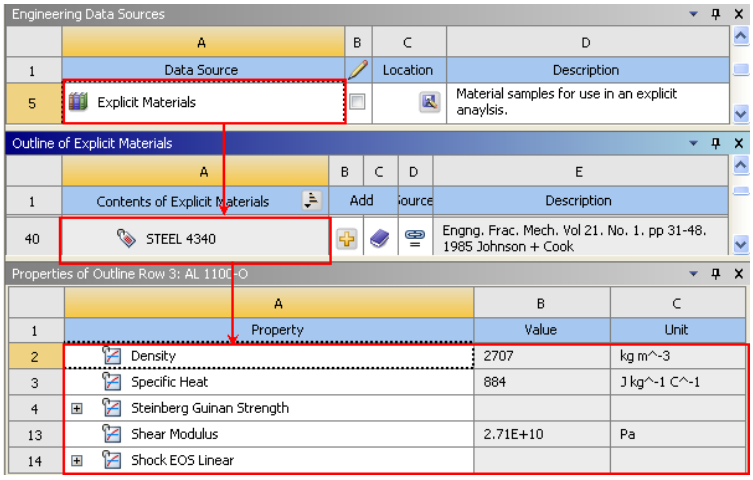


图 8-45　选择材料

Step4：选择完成后，单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回 Workbench 主界面。

5. 显示动力学分析前处理

Step1：双击项目 A 中的 A4（Model）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 8-46 所示。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Geometry→Part 2 命令，在如图 8-47 所示的 Details of "Part 2"面板中做如下设置。

① 在 Definition→Thickness 中输入厚度值为 2.e-003m。

② 在 Material→Assignment 中选择 STEEL 4340 材料。

③ 其他两个几何模型程序选择默认材料即可。

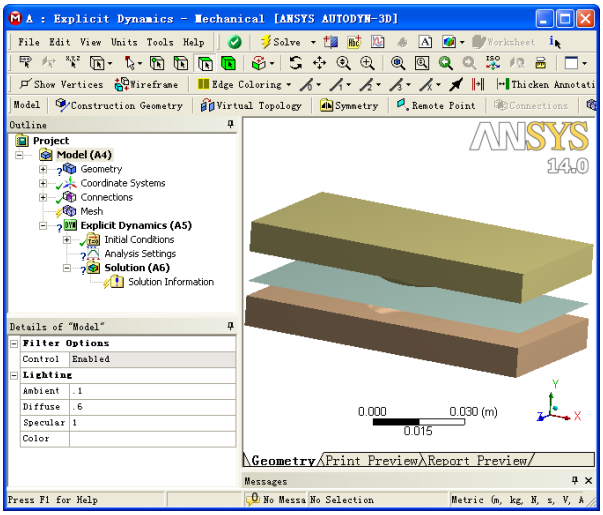


图 8-46　Mechanical 界面

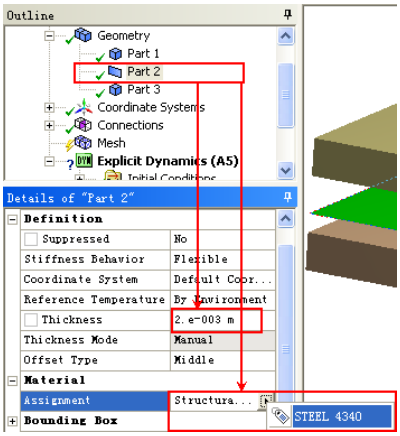


图 8-47　厚度设置

Step3：如图 8-48 所示右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Sizing 命令。

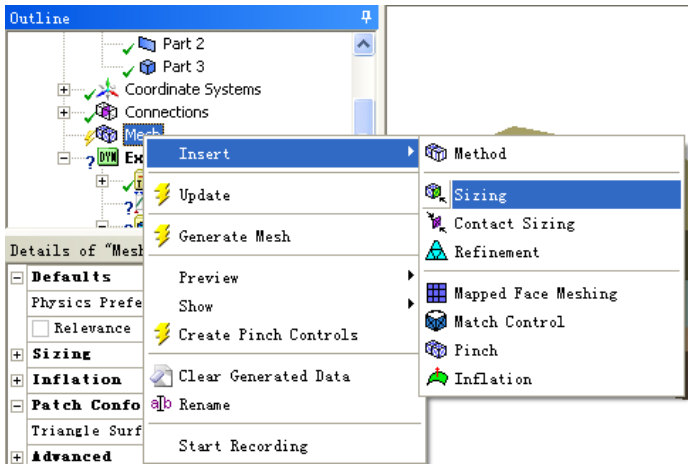


图 8-48　添加网格大小命令

Step4：如图 8-49 所示，在 Details of “Face Sizing”面板中做如下操作。

① 单击中间的板单元，然后单击 Geometry 后面的 Apply 按钮，确认几何选择。

② 在 Type→Element Size 栏中输入网格大小为 1.e-0003m。

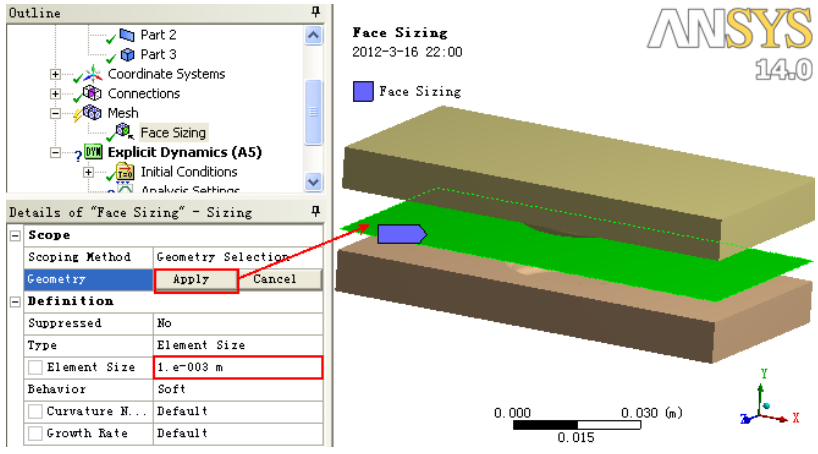


图 8-49　划分网格

Step5：同样添加 Sizing 命令，在如图 8-50 所示 Details of “Body Sizing”面板中做如下操作。

① 单击上下两个模具几何，然后单击 Geometry 后面的 Apply 按钮，确认几何选择。

② 在 Type→Element Size 栏中输入网格大小为 5.e-003m。

Step6：如图 8-51 所示，右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，划分网格。

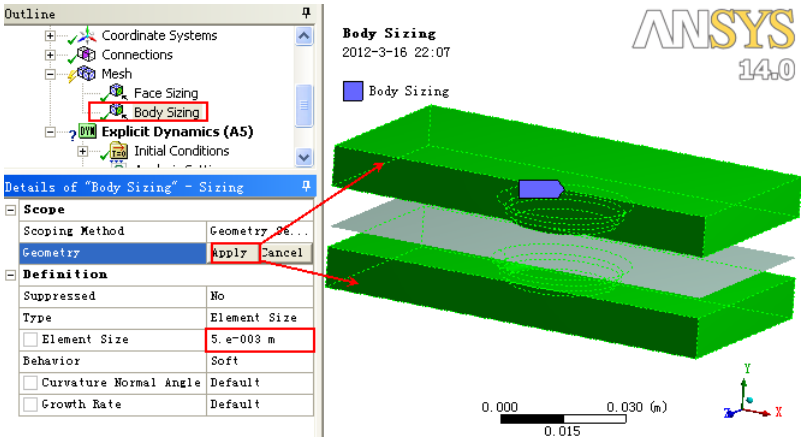


图 8-50　划分网格

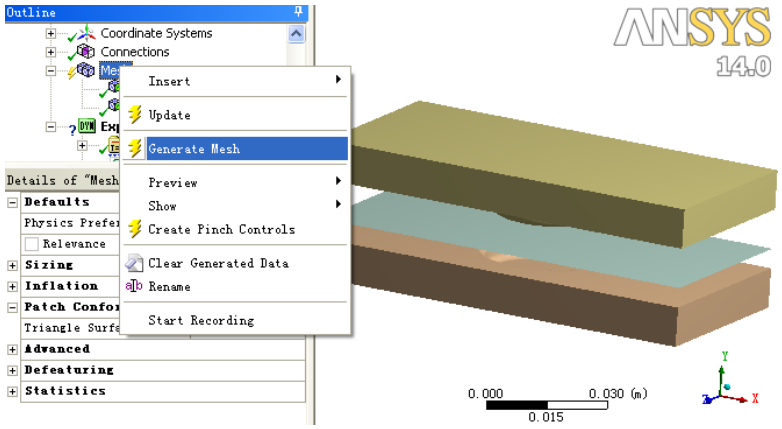


图 8-51　网格划分命令

Step7：图 8-52 所示为划分好的网格模型。

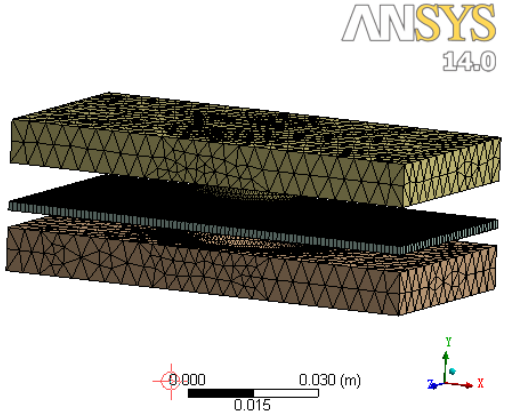


图 8-52　网格效果

6. 施加约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamics（A5）选项，此时会出现如图 8-53 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 8-54 所示。

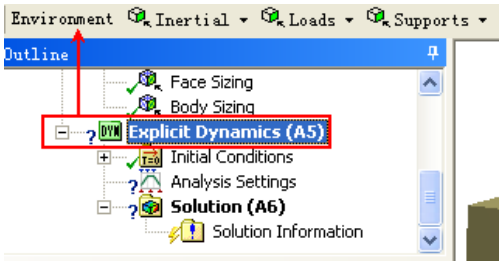


图 8-53　Environment 工具栏

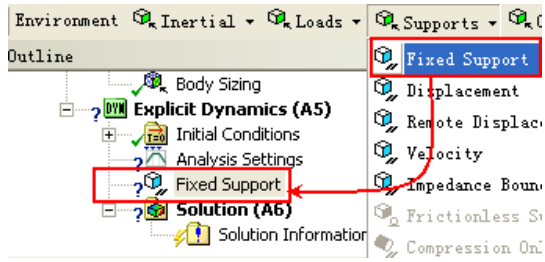


图 8-54　添加固定约束

Step3：单击工具栏中的（选择面）按钮，选择下面实体的下表面，如图 8-55 所示，确保 Details of “Fixed Support”中 Geometry 栏中出现 1 Face，表明下端面被选中，即可在选中的端面上施加固定约束。

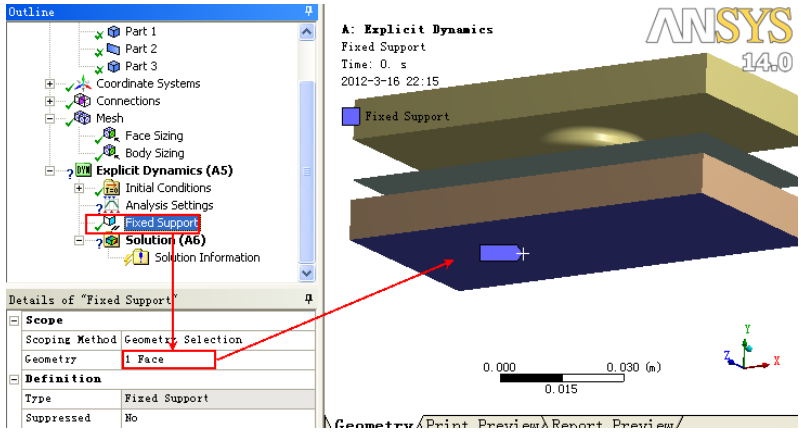


图 8-55　施加固定约束

Step4：再次选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamics（A5）选项，此时会出现如图 8-56 所示的 Environment 工具栏。

Step5：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Displacement（位移约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 8-57 所示。

Step6：单击工具栏中的（选择面）按钮，选择上面实体的上表面，如图 8-58 所示，单击 Details of “Displacement”中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，在 Y Component 栏中输入位移量为–2.3e-002m，即可在选中的面上施加位移约束。

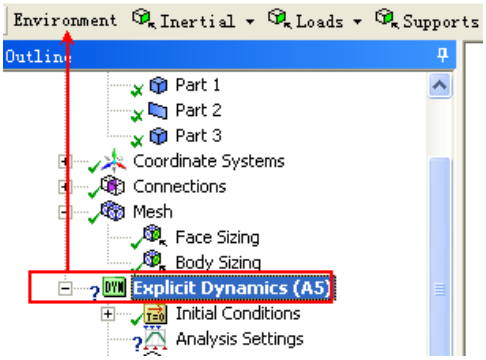


图 8-56　Environment 工具栏

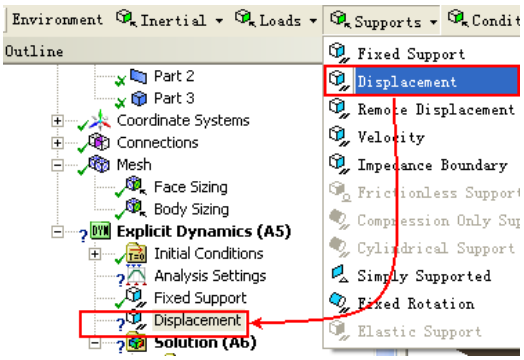


图 8-57　添加固定约束

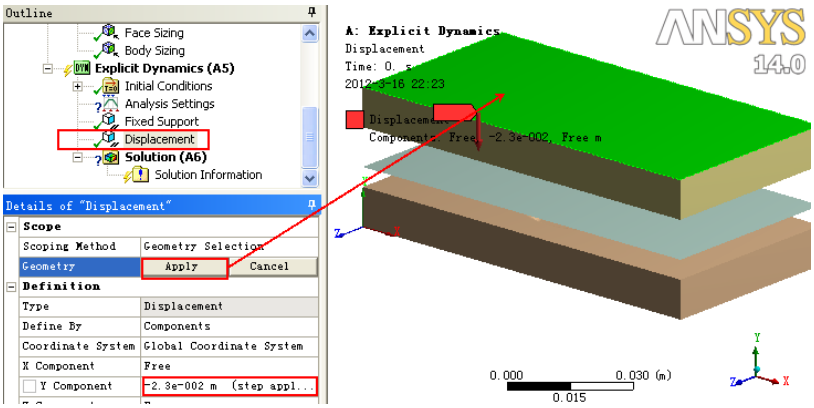


图 8-58　施加位移约束

Step7：选择 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamics（A5）→Analysis Settings 命令，如图 8-59 所示，在 Details of "Analysis Settings"面板中的 End Time 中输入截止时间为 0.015s。

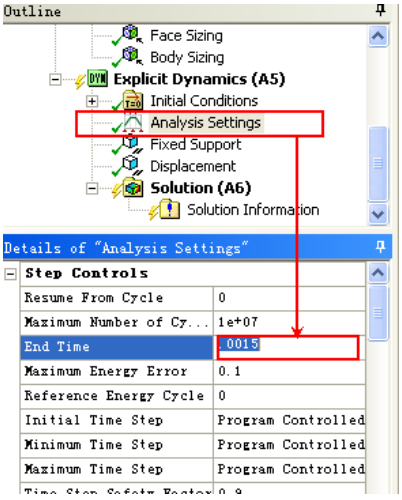


图 8-59　求解（一）

Step8：在 Outline（分析树）中的 Explicit Dynamics（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 8-60 所示。

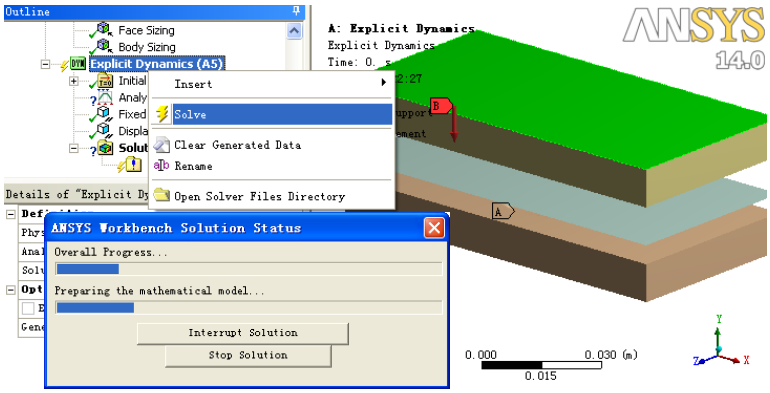


图 8-60　求解（二）

7. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现如图 8-61 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 8-62 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

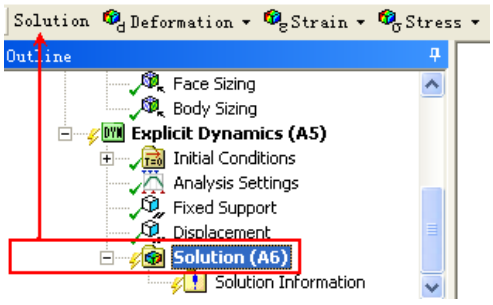


图 8-61　Solution 工具栏

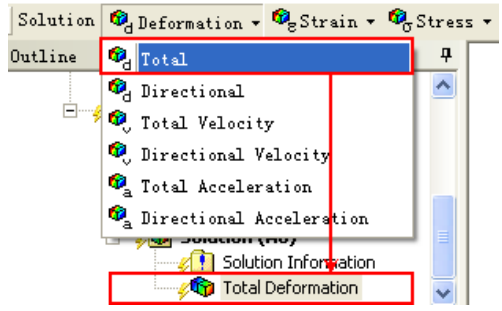


图 8-62　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 8-63 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 8-64 所示的总变形分析云图。

Step5：用同样的方法可以添加等效应变云图如图 8-65 所示。

Step6：单击如图 8-66 所示的图标可以播放动画。

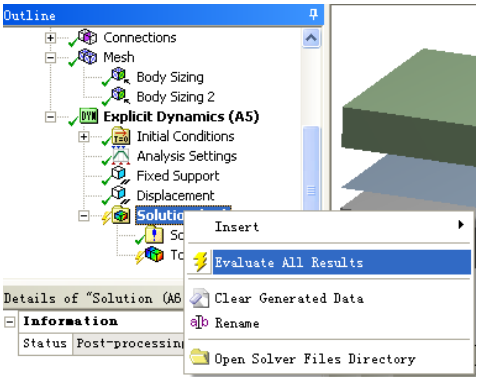


图 8-63　快捷菜单

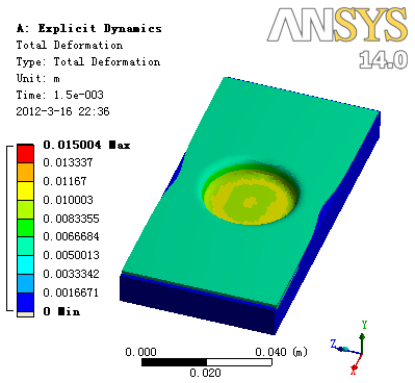


图 8-64　总变形

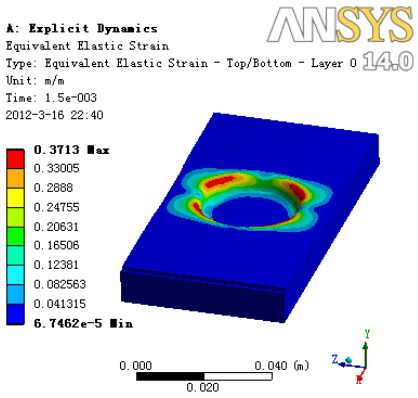


图 8-65　等效应变

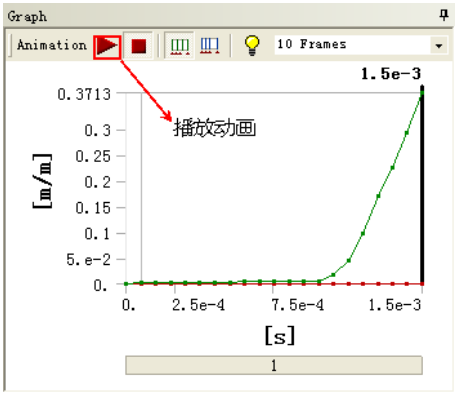


图 8-66　播放动画

Step7：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。

8. 启动 AUTODYN 软件

Step1：如图 8-67 所示，选择工具箱中 Component Systems→AUTODYN 命令，直接拖曳到项目 A 的 A5（Setup）栏中，此时在项目管理中出现项目 B。

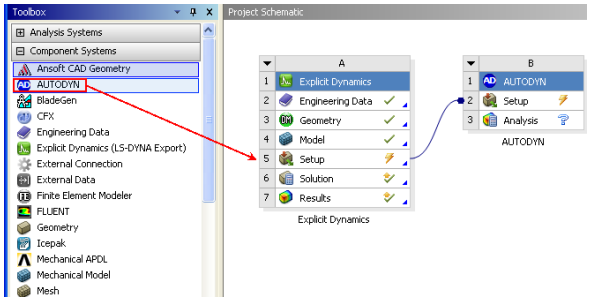


图 8-67　AUTODYN 命令

Step2：双击项目 A 中的 A5 栏，进行计算，计算完成后如图 8-68 所示。双击项目 B 的 B2 栏，即可启动 AUTODYN 软件。

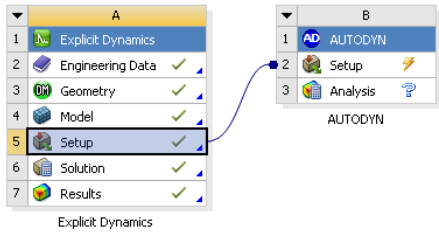


图 8-68　数据共享

Step3：图 8-69 所示为 AUTODYN 界面，此时几何文件的所有数据均已经被读入到 AUTODYN 软件中，在软件中只需单击 Run 按钮执行计算即可。

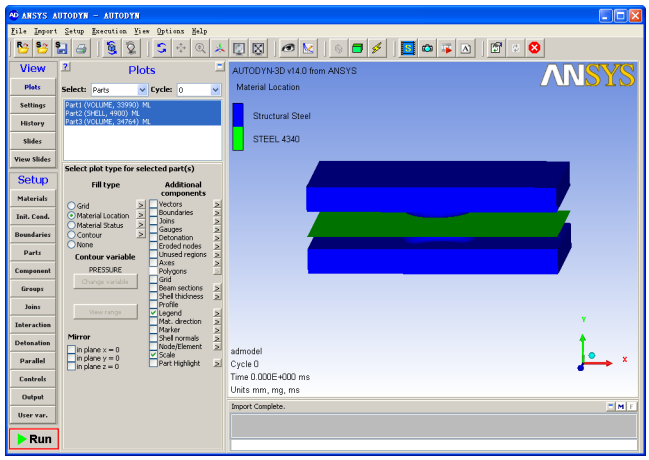


图 8-69　AUTODYN 界面

Step4：图 8-70 所示为 AUTODYN 计算过程数据显示。

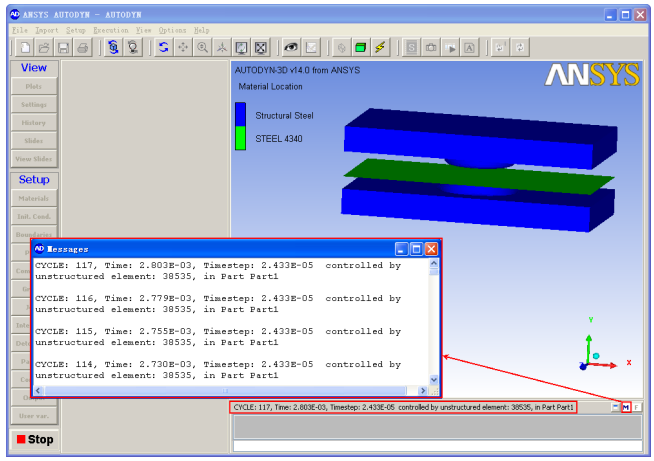


图 8-70　AUTODYN 界计算数据显示

9. LS-DYNA 计算

Step1：如图 8-71 所示，可以添加 Explicit Dynamics（LS-DYNA Export）到项目 A 的 A4 中，此时直接双击项目 C 的 C5 栏即可执行相关计算处理。

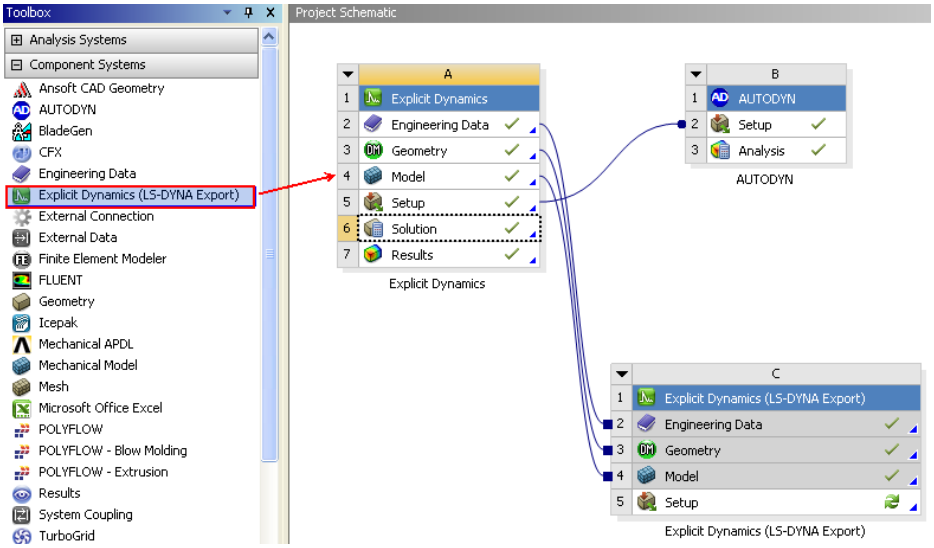


图 8-71　Explicit Dynamic（LS-DYNA Export）添加

Step2：计算完成后启动 ANSYS Mechanical APDL Product Launcher 软件，如图 8-72 所示。

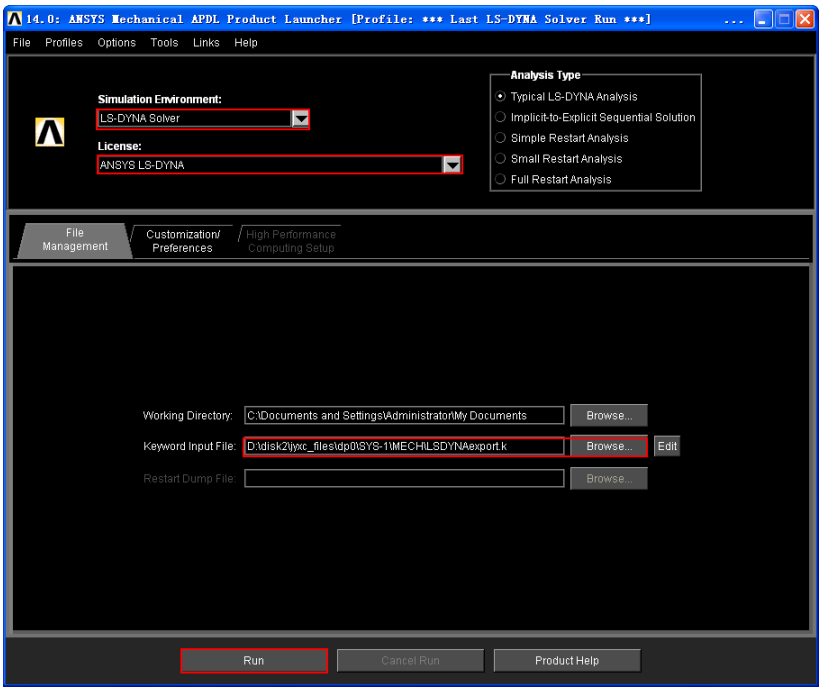


图 8-72　启动 ANSYS Mechanical APDL

Step3：图 8-73 所示为 LS-DYNA 进行计算的 LOG 文件。读者感兴趣可以参考 ANSYS 经典版相关书籍，这里不详细讲解。

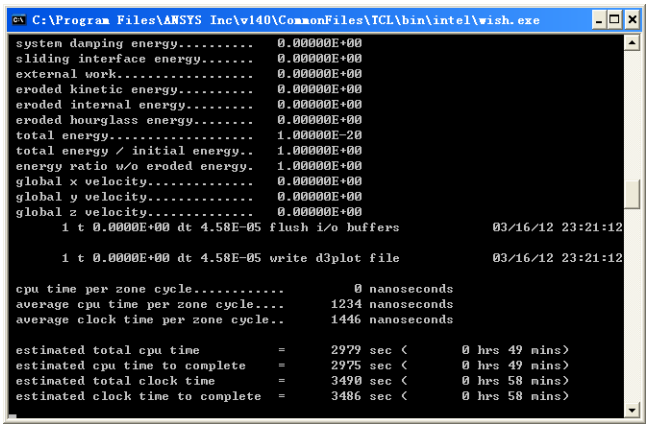


图 8-73　log 文件

10. 保存与退出

Step1：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的Save（保存）按钮，保存文件名为 jiyachengxing.wbpj。

Step2：单击右上角的（关闭）按钮，退出如图 8-74 所示的 Workbench 界面，完成项目分析。

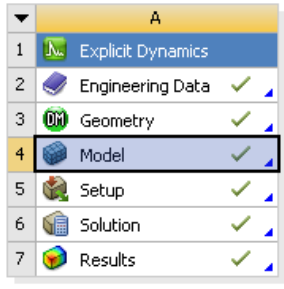


图 8-74　项目管理区中的分析项目

8.4 本章小结

本章详细地介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件内置的显式动力学分析功能，包括几何导入、网格划分、边界条件设定、后处理等操作，同时还简单介绍了与 AUTODYN 和 LS—DYNA 两款软件的数据导出，与两款软件的启动方法。

通过本章的学习，读者应该对显示动力学分析的过程有了详细的了解。

第 9 章

结构非线性分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的非线性分析简要讲解，并通过一个典型案例对碰撞分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件大变形分析的过程。

（2）了解非线性分析与其他分析的不同之处。

（3）了解非线性分析的应用场合。

9.1 结构非线性分析简介

非线性行为，简单来说就是，如果载荷能够引起结构刚度的显著改变，此结构就是非线性的。结构刚度改变的典型原因有如下几点。

- 应变超出弹性极限，即产生塑性变形。
- 大挠度，如钓鱼过程中的鱼竿受力变形。
- 接触，如两物体之间的接触变形。

引起非线性的原因有很多种，但总体上可以归纳为以下三种。

- 几何非线性：如果某个结构出现了大变形，其变化的几何外形会导致非线性行为，如图 9-1 所示的鱼竿钓鱼过程为常见的几何非线性。

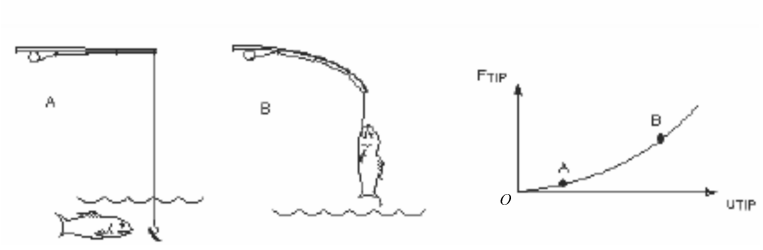


图 9-1　几何非线性

- 材料非线性：非线性的应力——应变关系是典型的材料非线性，如图 9-2 所示为金属塑性变形曲线。

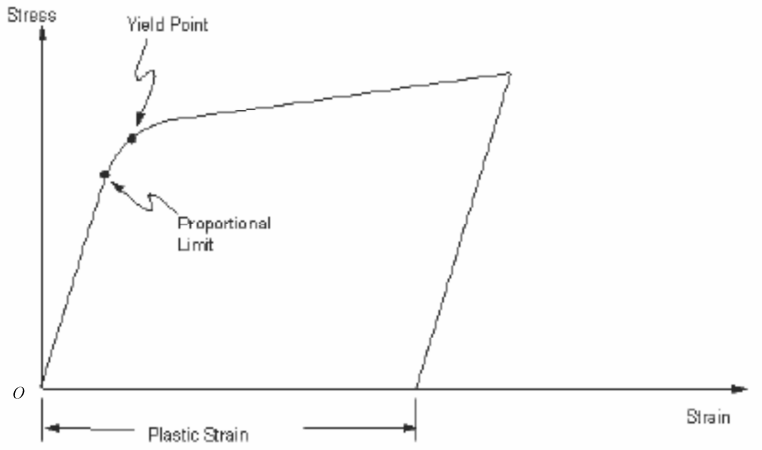


图 9-2　材料非线性

- 状态变化非线性：接触效应是一种“状态改变”非线性，当两个接触物体相互接触或者分离时会发生刚度的突然变化，此时也会出现非线性。如图 9-3 所示为接触非线性行为。

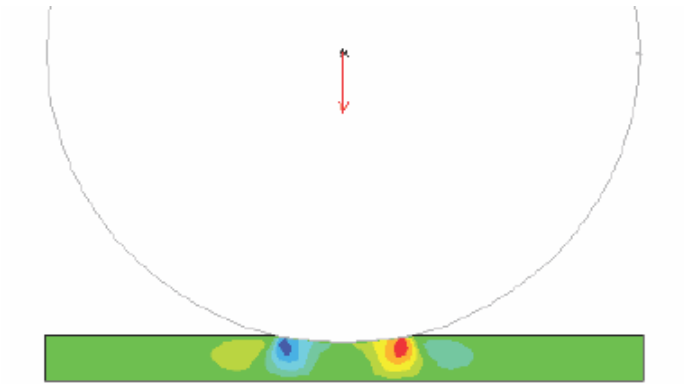


图 9-3　状态变化非线性

1. 非线性分析

当输入几何实体是组合体时，两个实体之间需要设置接触对，接触对设置时允许在两个实体边界上存在不匹配的网格，接触对设置类型有四种，见表 9-1。

表 9-1　接触类型

Contact Type	Iterations	Normal Behavior（Separation）	Tangential Behavior（Sliding）
Bonded	1	Closed	Closed
No Separation	1	Closed	Open
Frictionless	Multiple	Open	Open
Rough	Multiple	Open	Closed

- Bonded（绑定）和 No Separation（不分离）两种接触是最基础的线性行为，故仅仅需要迭代一次即可。
- Frictionless（无摩擦）和 Rough（粗糙）接触是非线性接触行为，需要多次迭代。但是，需要注意的是仍然利用小变形理论的假设。

2. 塑性

当韧性材料承受的应力超过其弹性极限时就会屈服产生永久变形。

- 塑性是指材料响应超过屈服极限。
- 塑性对金属成型非常重要。

塑性作为结构在服务中的能量吸收机制同样重要，在小塑性变形时就会破坏的材料是脆性材料；韧性响应在多数情况下比脆性响应安全。

3. 屈服准则

（1）屈服准则用来联系多轴和单轴应力状态。

- 试件的拉伸试验提供单轴数据，可以很容易地绘制一维应力——应变曲线。
- 实际结构通常呈现多轴应力状态。屈服准则提供了可以和单轴状态相比较的材料应力状态的标量不变测度。

（2）von Mises 屈服准则是一个常用的屈服准则（也是八面体剪应力或能量畸变准则）。von Mises 等效应力定义如下。

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \tag{9-1}$$

4. 非线性分析

非线性静态分析中，刚度 $[\boldsymbol{K}]$ 依赖于位移 $\{\boldsymbol{x}\}$，不再是常量，即

$$[\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x})]\{\boldsymbol{x}\} = \{\boldsymbol{F}(t)\} \tag{9-2}$$

式中，$[\boldsymbol{K}(\boldsymbol{x})]$ 是刚度矩阵；$\{\boldsymbol{x}\}$ 是位移矢量；$\{\boldsymbol{F}(t)\}$ 是力矢量。

9.2 项目案例——接触大变形分析

本章主要介绍利用 ANSYS Workbench 14.0 的瞬态动力学分析模块，分析跌落过程。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 建模方法及跌落过程分析的方法。

模型文件	光盘\model\drop.stp
结果文件	光盘\example\Ding_Explicit.wbpj

1. 问题描述

如图 9-4 所示为某模型，请用 ANSYS Workbench 分析其跌落过程的响应及应力分布。

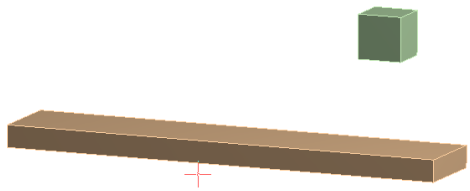


图 9-4　模型

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 9-5 所示。

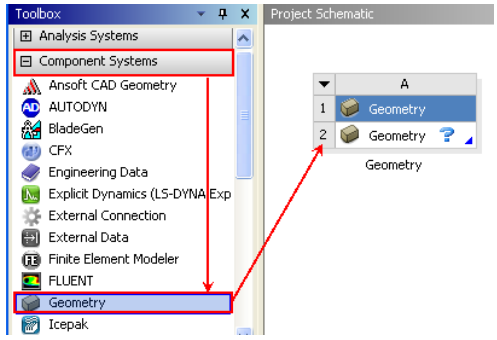


图 9-5　创建分析项目 A

3. 创建几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 9-6 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出如图 9-7 所示的“打开”对话框中，将文件类型设置成 STEP 格式，然后选择 drop.stp 文件，单击“打开”按钮。

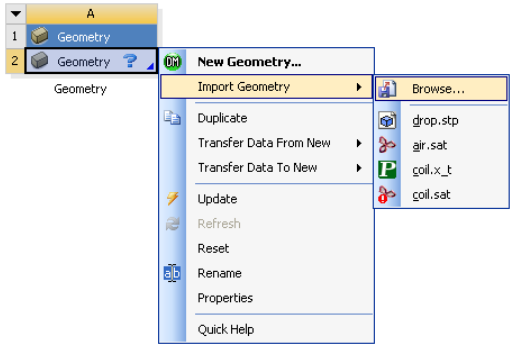


图 9-6　导入几何体

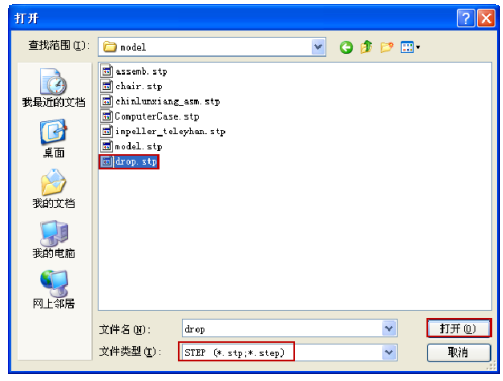


图 9-7　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 栏，此时会启动如图 9-8 所示的 DesignModeler 平台，设置单位为 mm，关闭“单位设置”对话框。

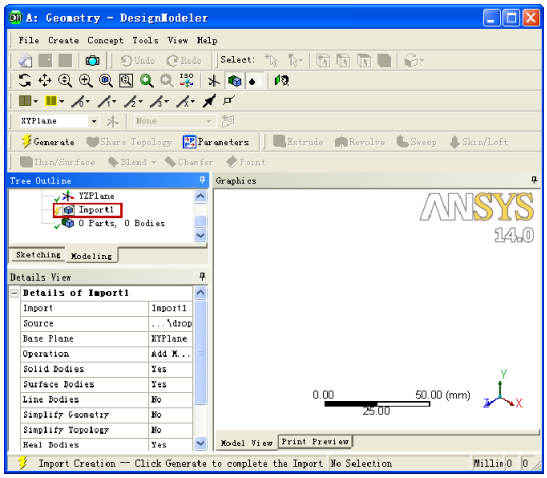


图 9-8　启动 DesignModeler

Step4：如图 9-9 所示，单击工具栏中的 Generate 按钮生成几何图形。

Step5：单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。

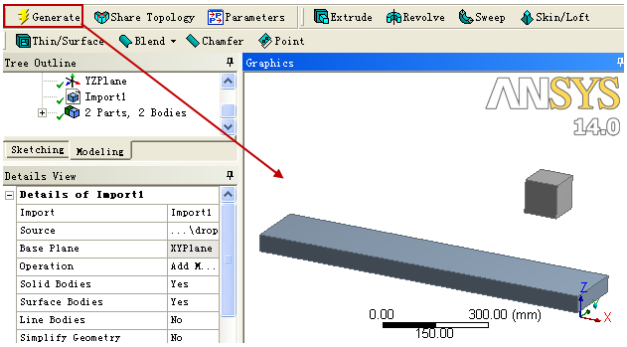


图 9-9　生成几何

4. 瞬态分析

选择主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Transient Structural（瞬态结构分析）命令，如图 9-10 所示，然后将鼠标移动到项目 A 的 A2（Geometry）中，此时在项目 A 的右侧出现一个项目 B，项目 A 与项目 B 的几何数据实现共享。

5. 创建材料

Step1：双击项目 B 中的 B2Engineering Data 选项，进入如图 9-11 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

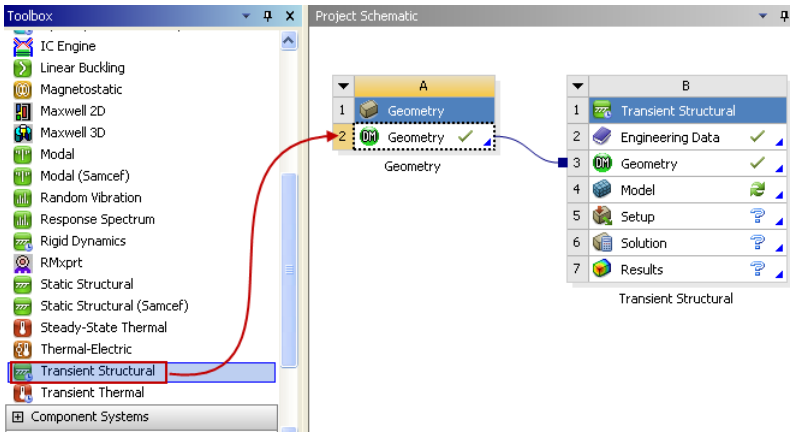


图 9-10　创建瞬态分析

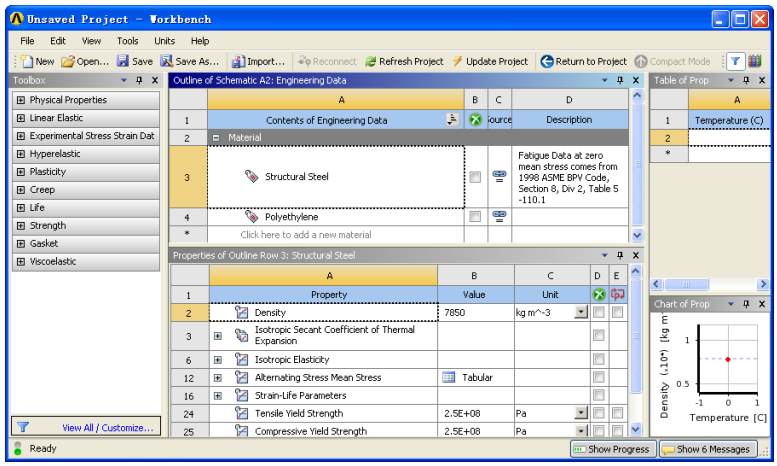


图 9-11　材料参数设置界面

Step2：在工具栏中单击按钮，此时弹出如图 9-12 所示的材料库。

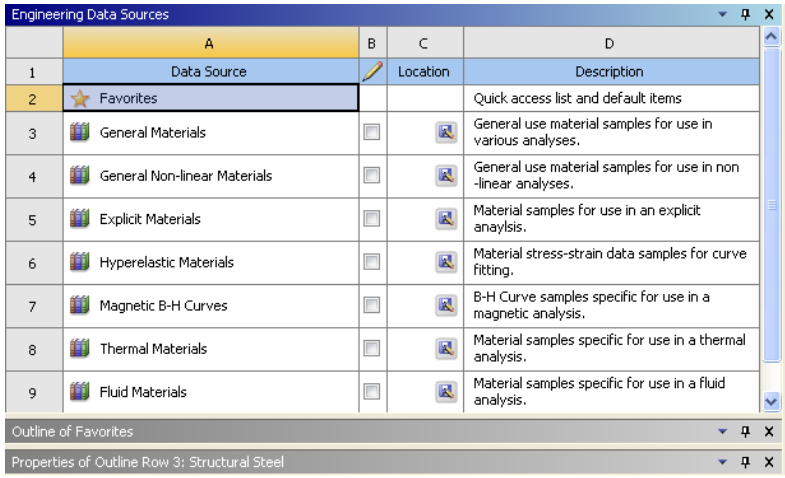


图 9-12　材料库

Step3：选择 Engineering Data Sources（工程数据源）中的 General Materials（普通材料）选项，在弹出的如图 9-13 所示的 Outline of General Materials（材料列表）中选择 Stainless Steel（不锈钢）选项。

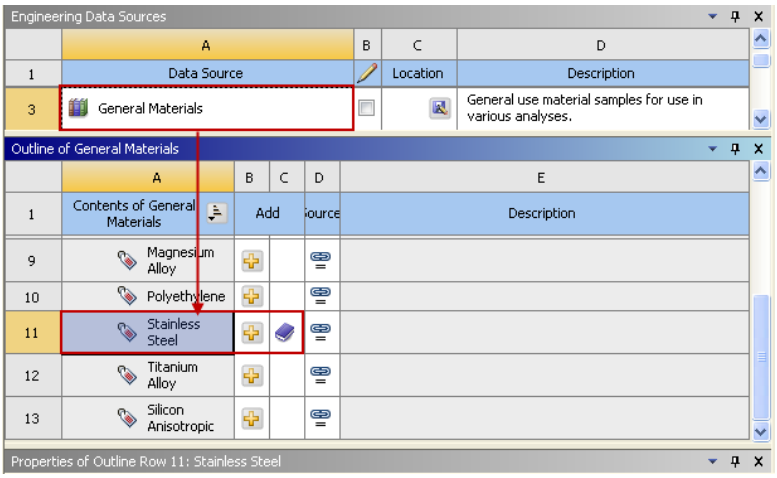


图 9-13　选择材料

Step4：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面。

6. 瞬态分析前处理

Step1：双击项目 B 中的 B4（Model）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 9-14 所示。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Geometry→ID1-1 和 ID1 选项，此时可在 Details of “Multiple Selection”（参数列表）中设置材料属性，如图 9-15 所示，将材料 Stainless Steel 赋给几何实体。

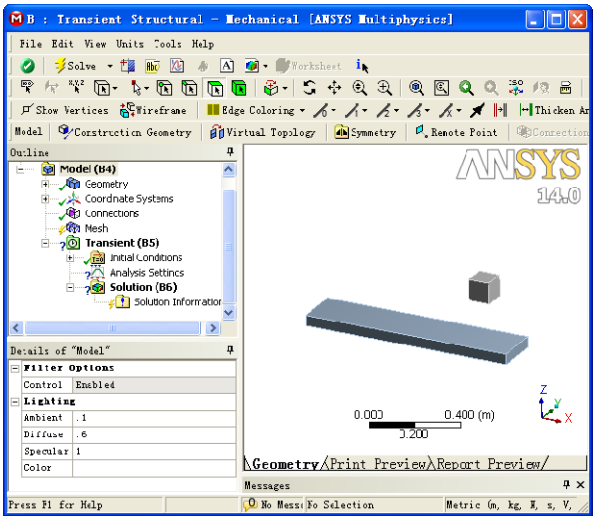


图 9-14　Mechanical 界面

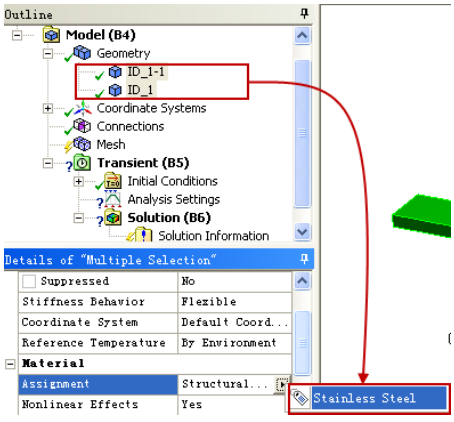


图 9-15　赋予材料属性

Step3：选择如图 9-16 所示的 ID1-1 选项，在 Details of “ID-1-1”面板中的 Stiffness Behavior 栏中选择 Rigid 选项，将实体设置成刚体。

注：ANSYS Workbench 中刚体不进行有限元划分与计算。

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 9-17 所示，在 Relevance Center 中选择 Fine 选项，其余采用默认设置。

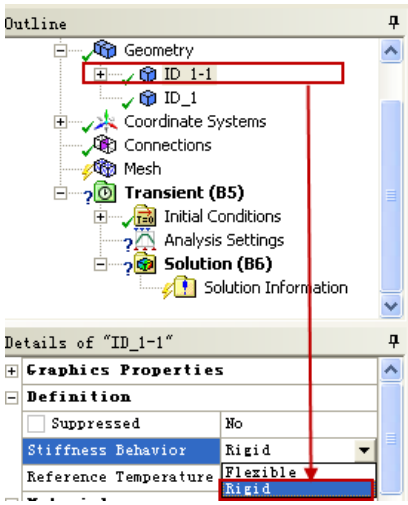


图 9-16　设置刚体

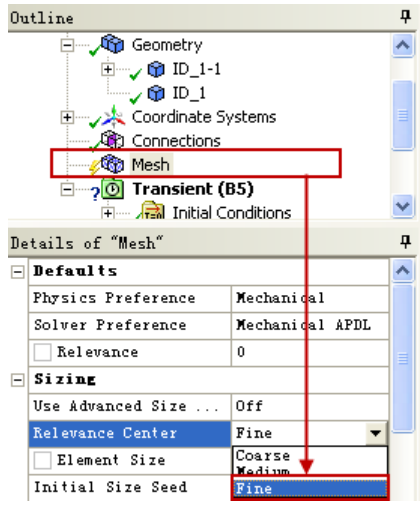


图 9-17　设置网格

Step5：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 9-18 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 9-19 所示。

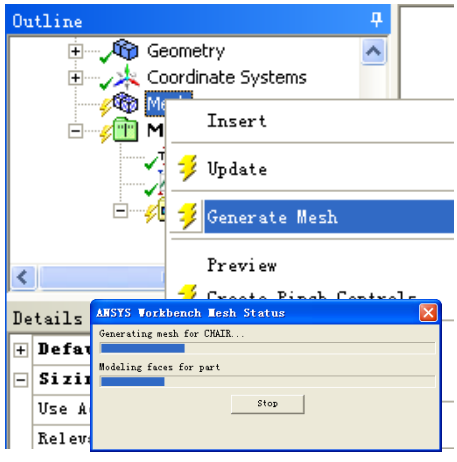


图 9-18　划分网格

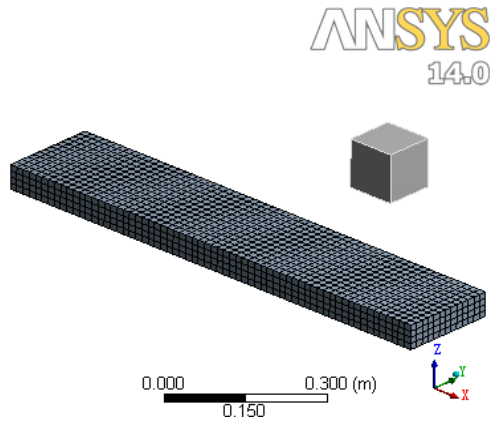


图 9-19　网格效果

Step6：选择 Outlines（分析树）中的 Connections 选项，选择如图 9-20 所示出现的 Connections 工具栏中的 Contact→Frictional 命令。

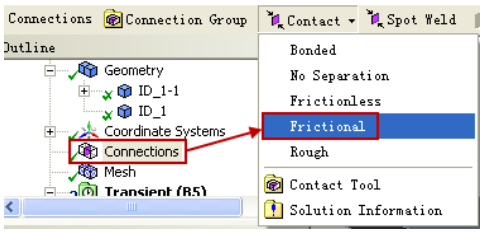


图 9-20　添加接触类型

Step7：在如图 9-21 所示的面板中做如下设置。

① 在 Contact 栏中选择上面实体的底面。

② 在 Target 栏中选择下面实体的上面。

③ 在 Type 栏中选择 Frictional 选项。

④ 在 Frictional Size 中输入 2.e-002。

⑤ 在 Normal Stiffness 栏中选择 Manual。

⑥ 在 Normal Stiffness Factor 中输入 1。

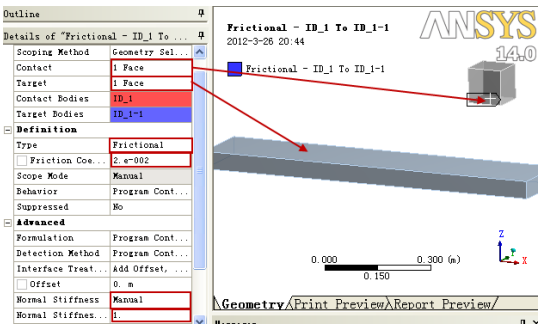


图 9-21　接触设置

7. 施加约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Transient（B5）选项，此时会出现如图 9-22 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 9-23 所示。

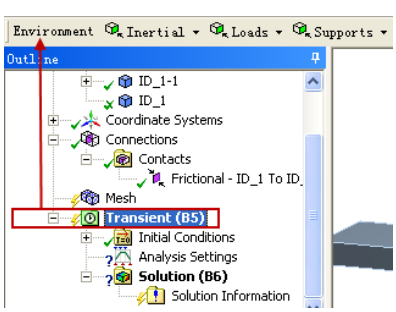


图 9-22　Environment 工具栏

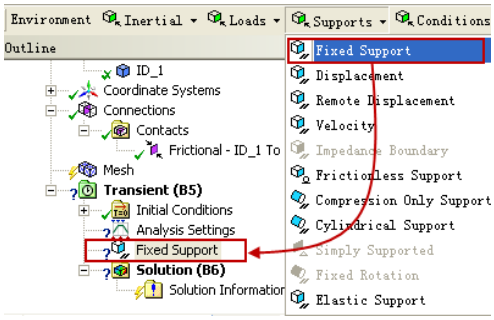


图 9-23　添加固定约束

Step3：单击工具栏中的（选择面）按钮，选择中 Fixed Support 选项，选择下面实体的一端，单击 Details of “Fixed Support” 中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中的面上施加固定约束，如图 9-24 所示。

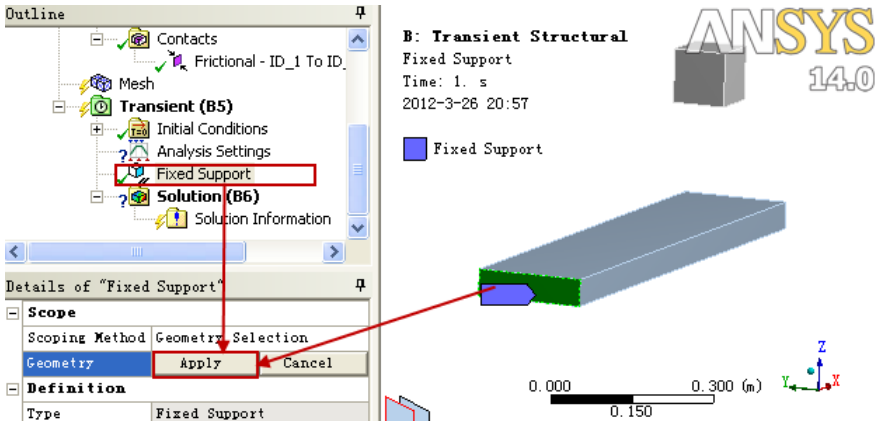


图 9-24　施加固定约束

Step4：选择 Transient（B5）→Analysis Settings 命令，在如图 9-25 所示的 Details of “Analysis Settings” 面板中做如下设置。

① 在 Step End Time 栏中输入 0.5s。

② 在 Define By 栏中选择 Substeps 选项。

③ 其余默认即可。

Step5：选择 Transient（B5）选项，添加如图 9-26 所示的标准重力加速度命令。

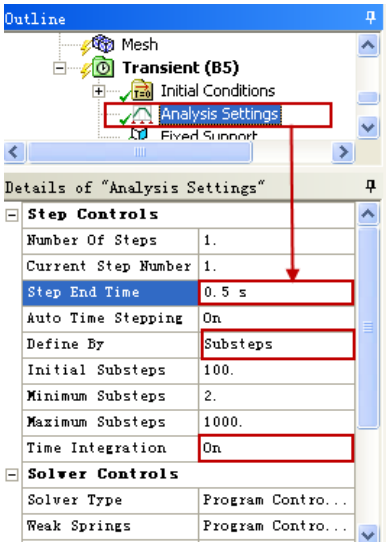


图 9-25　分析设置

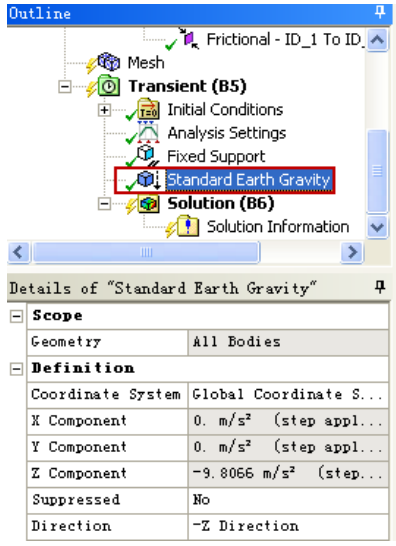


图 9-26　添加重力加速度

Step6：在 Outline（分析树）中的 Transient（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 9-27 所示。

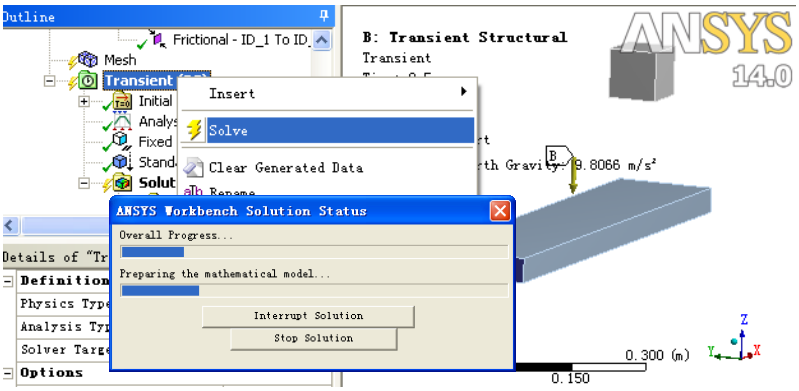


图 9-27　求解

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 9-28 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 9-29 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

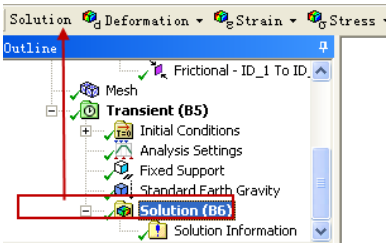


图 9-28　Solution 工具栏

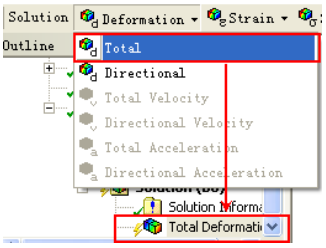


图 9-29　添加变形选项

Step3：如图 9-30 所示，右击 Solution（B6）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，此时开始进行后处理计算。

Step4：图 9-31 所示为模型的总变形图。

Step5：图 9-32 所示为模型的应力分布云图。

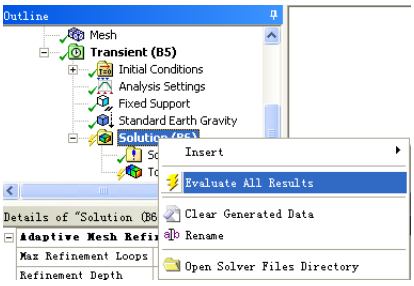


图 9-30　快捷菜单

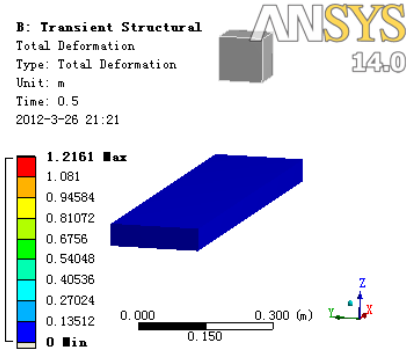


图 9-31　总变形

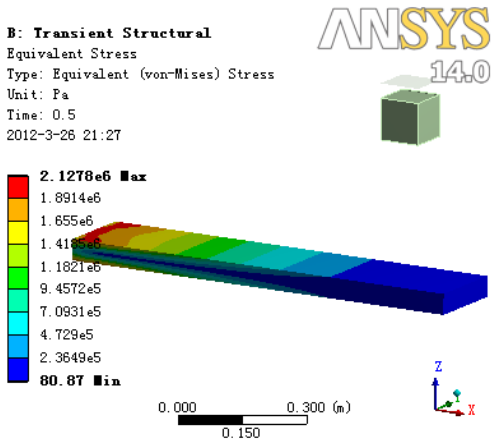


图 9-32　应力分布

9.3 本章小结

本章详细地介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件非线性动力学分析功能，包括几何导入、网格划分、边界条件设定、后处理等操作。

通过本章的学习，读者应该对显示动力学分析的过程有了详细的了解。

第 10 章

接触分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的接触分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对接触分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件接触分析的过程。

（2）了解接触分析与其他分析的不同之处。

（3）了解接触分析的应用场合。

10.1 接触分析简介

两个独立表面相互接触并相切，称为接触。一般物理意义上，接触的表面包含如下特征。

- 不会渗透。
- 可传递法向压缩力和切向摩擦力。
- 通常不传递法向拉伸力，即可自由分离和互相移动。

提示：接触是状态改变非线性。也就是说，系统刚度取决于接触状态，即零件间接触或分离。

从物理意义上来说，接触体间不相互渗透，所以，程序必须建立两表面间的相互关系以阻止分析中的相互穿透。程序阻止渗透称为强制接触协调性。

ANSYS Workbench 14.0 接触公式总结见表 10-1。

表 10-1　ANSYS Workbench 14.0 接触公式总结

Formulation	Normal	Tangential	Normal Stiffness	Tangential Stiffness	Type
Augmented Lagrange	Augmented Lagrange	Penalty	Yes	Yes[1]	Any
Pure Penalty	Penalty	Penalty	Yes	Yes[1]	Any
MPC	MPC	MPC	—	—	Bonded,No Separation
Normal Lagrange	Lagrange Multiplier	Penalty	—	Yes[1]	Any

注：1 表示切向接触刚度不能由用户直接输入。

10.2 项目案例 1——虎钳接触分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的接触分析功能，计算虎钳作业时的应力分布。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 接触设置及求解的方法及过程。

模型文件	光盘\model\vice.x_t
结果文件	光盘\example\vice_contact.wbpj

1. 问题描述

如图 10-1 所示为某虎钳模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算虎钳在 100N 夹紧力下的变形及应力分布。

2. 启动 Workbench 软件

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 10-2 所示。

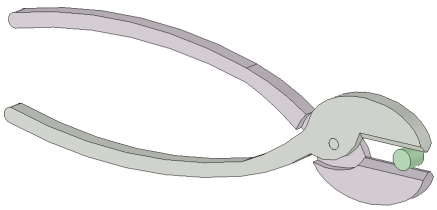


图 10-1　夹剪模型

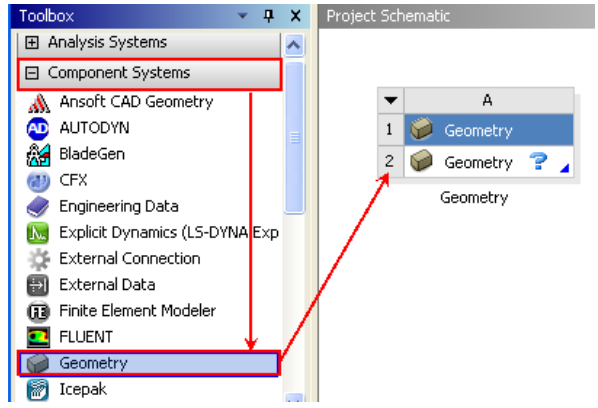


图 10-2　创建分析项目 A

3. 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 10-3 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 vice.x_t 几何体文件，如图 10-4 所示，此时 A2Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

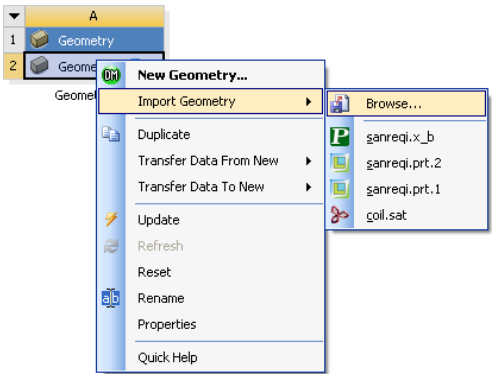


图 10-3　导入几何体

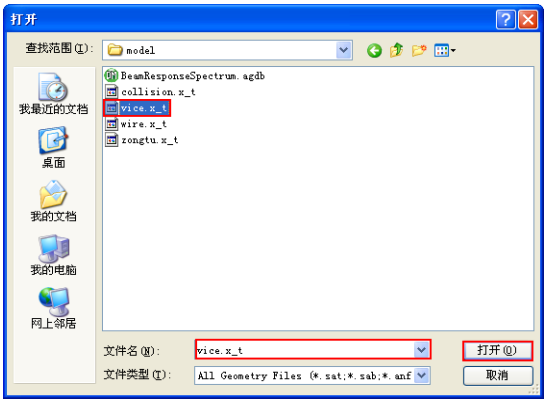


图 10-4　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry 选项，此时会进入到 DesignModeler 界面，在弹出的“单位设置”对话框选择 Millimeter，单击 OK 按钮。此时设计树中 Import1 前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 10-5 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 10-6 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

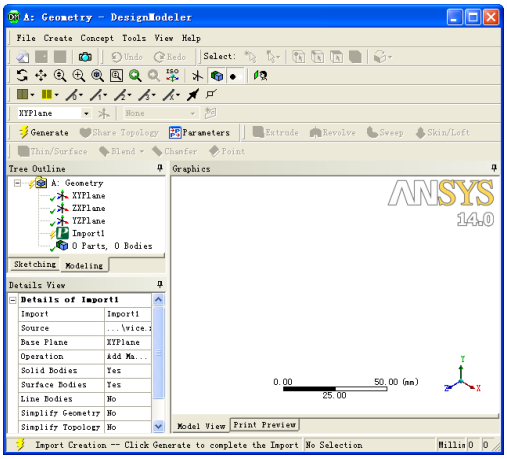


图 10-5　生成前的 DesignModeler 界面

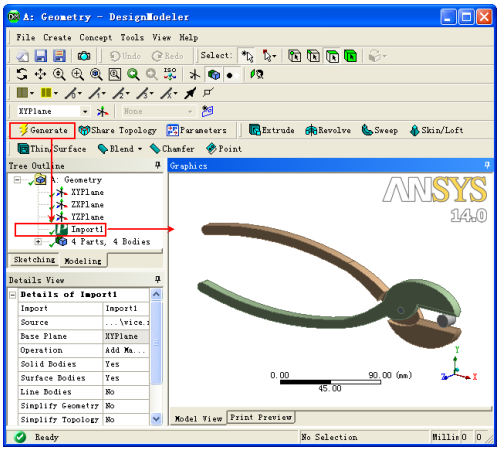


图 10-6　生成后的 DesignModeler 界面

Step5：单击工具栏中的图标，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 vice_contact，并单击“保存”按钮。

Step6：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

4. 创建分析项目

Step1：如图 10-7 所示，在 Workbench 主界面的 Toolbox（工具箱）→Analysis Systerms 中选择 Static Structural（静态结构分析）选项，并直接拖曳到项目 A 的 A2（Geometry）栏中。

Step2：此时会出现如图 10-8 所示的项目 B，同时在项目 A 的 A2（Geometry）与项目 B 的 B2（Geometry）之间出现一条连接线，此时说明数据在项目 A 与项目 B 之间实现共享。

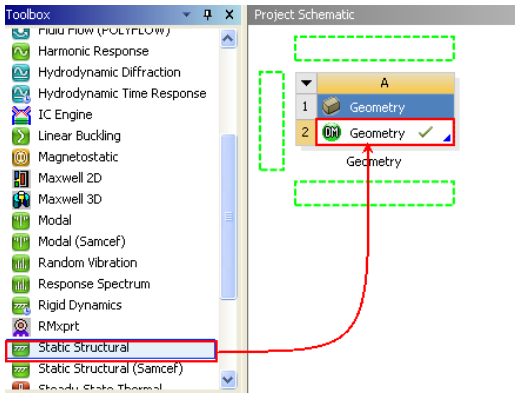


图 10-7　创建项目

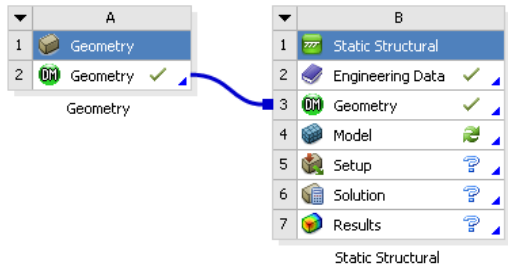


图 10-8　项目数据共享

5. 添加材料库

Step1：双击项目 B 中的 B2Engineering Data 选项，进入如图 10-9 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

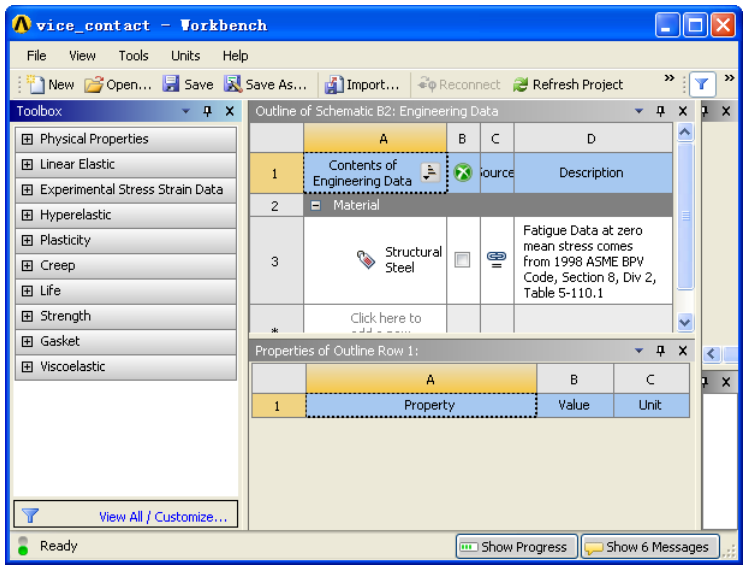


图 10-9　材料参数设置界面（一）

Step2：在界面的 A1 表中右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 10-10 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

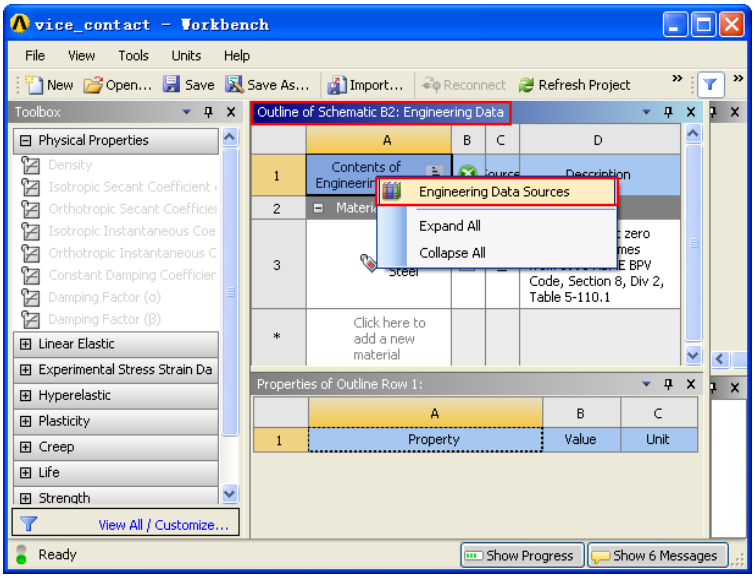


图 10-10　材料参数设置界面（二）

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A5 栏 Aluminium Alloy（铝合金）后的 B5 栏的（添加）按钮，此时在 C5 栏中会显示（使用中的）标识，如图 10-11 所示，标识材料添加成功。

Step4：同步骤 Step2，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 10-12 所示，本实例采用的是默认值。

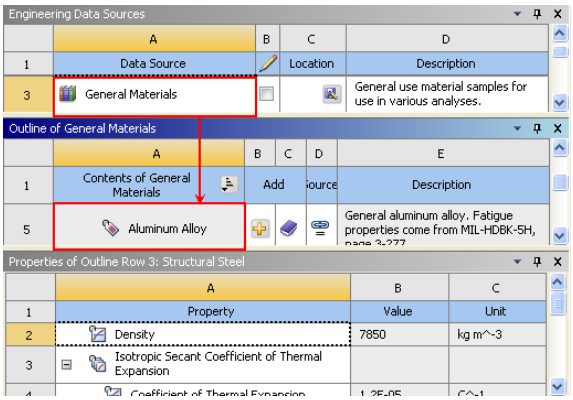


图 10-11　添加材料

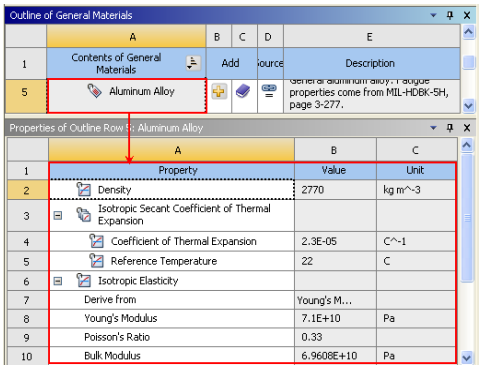


图 10-12　材料参数修改窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

6. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B4 栏 Model 选项，进入如图 10-13 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

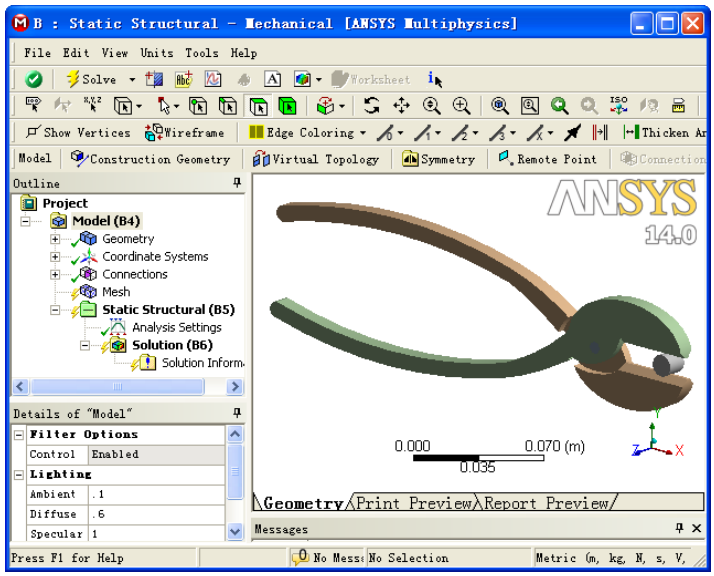


图 10-13　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中 Geometry 选项下的 component4，此时即可在 Details of "component4"（参数列表）中给模型添加材料，如图 10-14 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 后的按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Aluminium Alloy，选择即可将其添加到模型中去。其余模型采用默认的即可。

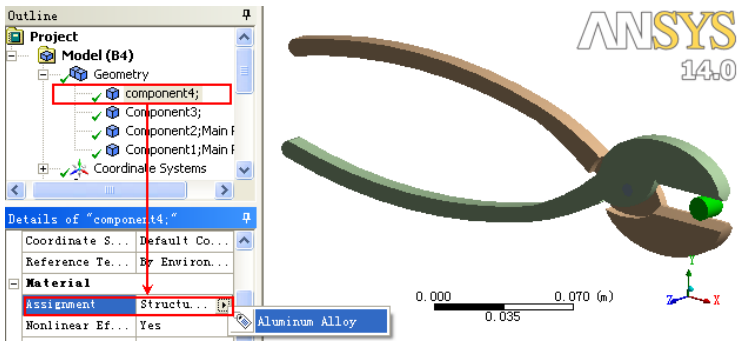


图 10-14　修改材料属相

7. 创建接触

Step1：右击 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Connections→Contact 命令，如图 10-15 所示，在弹出的快捷菜单中选择 Delete 命令，删除默认的接触设置。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Connections 选项，此时会弹出如图 10-16 所示的 Connections 工具栏。

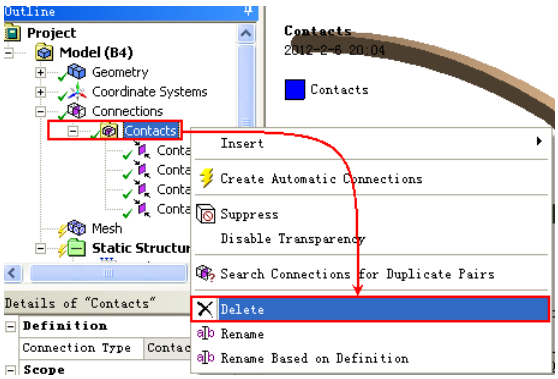


图 10-15　删除默认设置

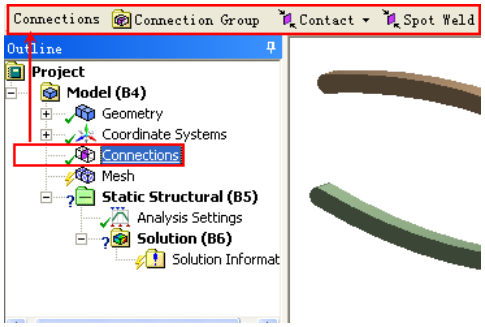


图 10-16　接触工具栏

Step3：选择 Connections 工具栏中的 Contact→Bonded 命令，如图 10-17 所示，此时在 Connections 下面出现一个？ Bonded - No Selec图标，表示接触还未被设置。

Step4：选择 component4 实体的外表面，如图 10-18 所示，在 Details of “Bonded”面板下面的 Contact 中单击 Apply 按钮。

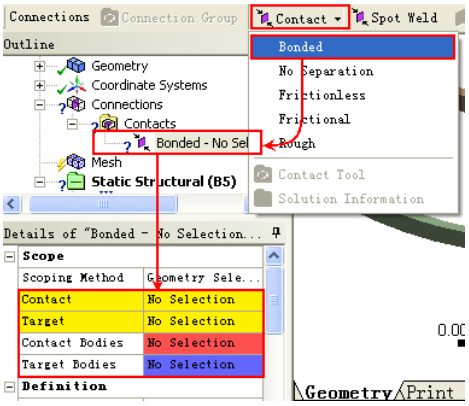


图 10-17　添加接触设置

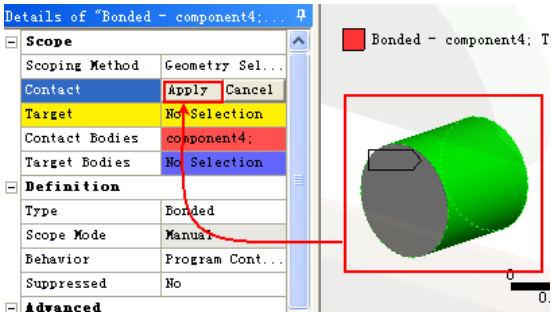


图 10-18　设置接触面（一）

Step5：选择 Outline 中的 Project→Model（B4）→Geometry 命令，然后单击工具栏中的按钮，使其被选中，单击如图 10-19 所示的面。

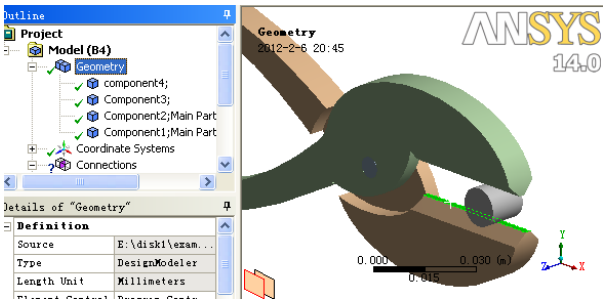


图 10-19　设置接触面（二）

Step6：选择 Connections 工具栏中的 Contact→Bonded 命令，如图 10-20 所示，在 Details of “Bonded”面板下面的 Target 中单击 Apply 按钮，完成第一个接触面的设置。

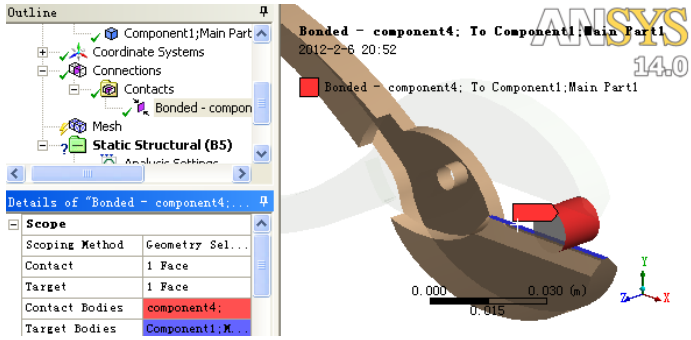


图 10-20　接触对设置（一）

Step7：与以上操作相同，请读者自己完成另外一对接触对的设置，设置完成后的接触对如图 10-21 所示。

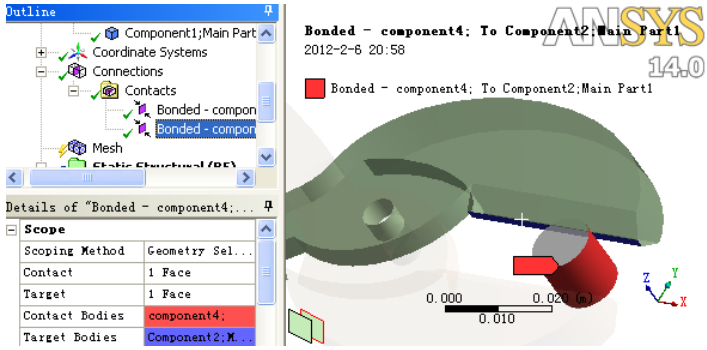


图 10-21　接触对设置（二）

Step8：选择 Connections 工具栏中的 Body-Body→Revolute 命令，如图 10-22 所示，此时在 Connections 下面出现一个 Revolute - No Selecti 图标，表示转动副还未被设置。

Step9：如图 10-23 所示，在绘图区域选择其中一个模型，右击后在弹出的快捷菜单中选择 Hide All Other Bodies 命令，隐藏其他模型。

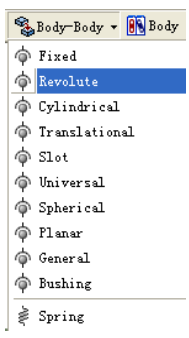


图 10-22　转动副设置

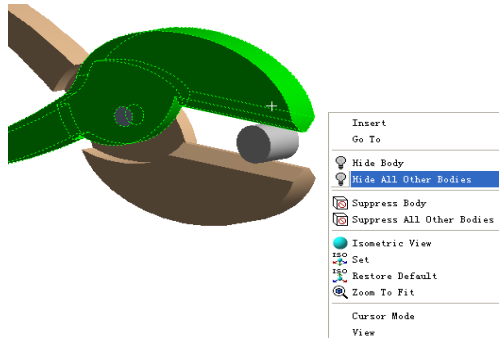


图 10-23　接触对设置（三）

Step10：如图 10-24 所示，保持 Revolute - No Selecti 选项被选中，选择实体内侧面，然后在 Details of “Revolute”面板中的 Reference→Scope 中单击 Apply 按钮，确定选择。

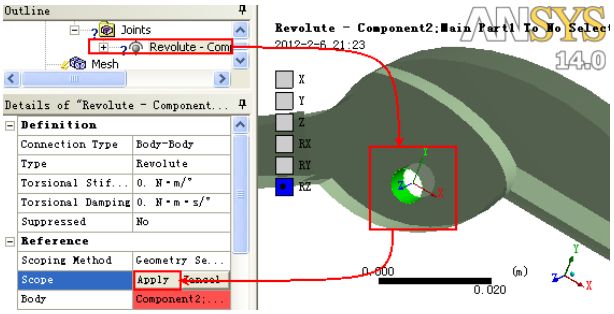


图 10-24　接触对设置（四）

Step11：右击 Outline 中的 Project→Model（B4）→Geometry→Component3 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Hide All Other Bodies 命令，隐藏其他模型。

Step12：如图 10-25 所示，选择小圆柱外表面，然后单击 Revolute - No Selecti 图标，在 Details of “Revolute”面板中的 Mobile→Scope 中单击 Apply 按钮，确定选择。

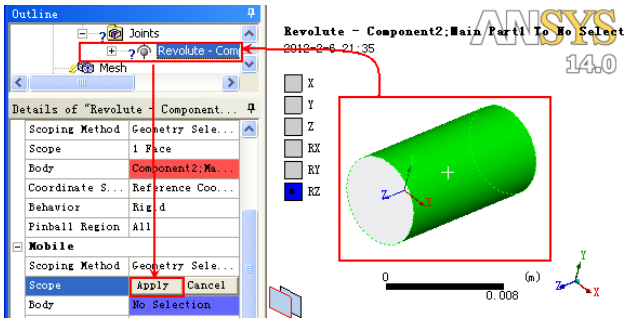


图 10-25　接触对设置（五）

Step13：参照以上操作步骤，对另外一对实体进行解除对设置，设置完成如图 10-26 所示。

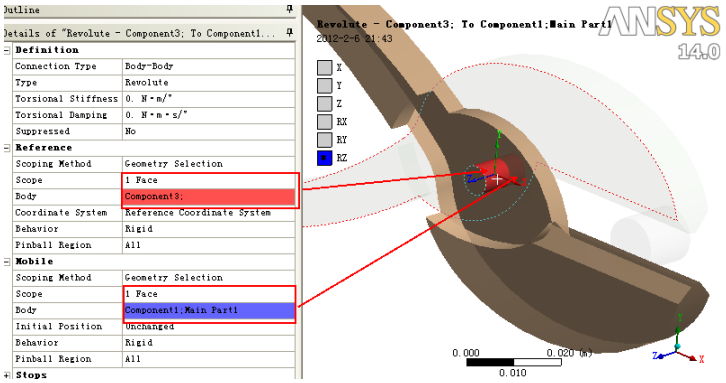


图 10-26　接触对设置（六）

8. 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，如图 10-27 所示，在 Sizing 中的 Relevance Center 中设置为 Fine，在 Element Size 中输入 0.002m，其余采用默认设置。

Step2：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 10-27 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 10-28 所示。

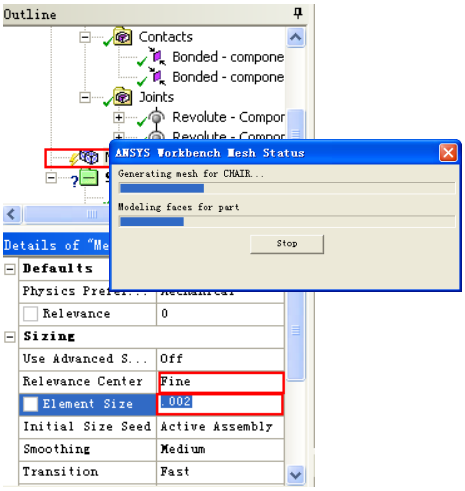


图 10-27　生成网格

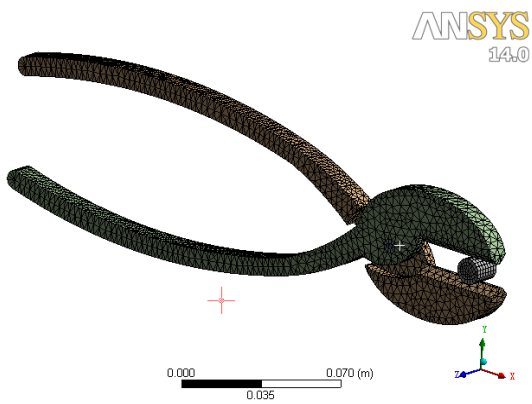


图 10-28　网格效果

9. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural （B5）选项，此时会出现如图 10-29 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 10-30 所示。

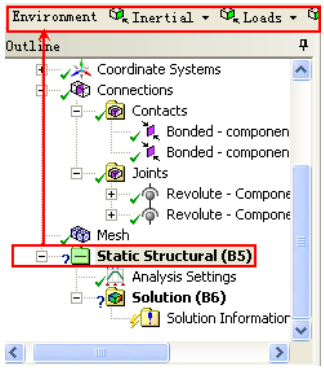


图 10-29　Environment 工具栏

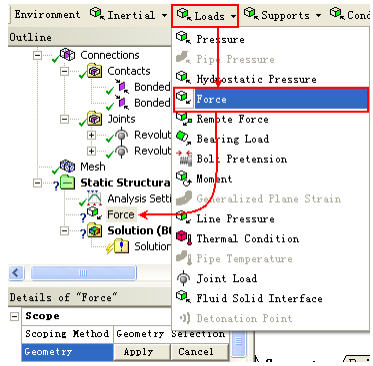


图 10-30　添加载荷

Step3：如图 10-31 所示，选择 Force 选项，选择需要施加载荷的面，确保 Details of “Force”中 Geometry 栏中显示 1 Face，表明虎钳-端面被选中，在 Definition→Define By 中选择 Components 选项，在 Y-Component 中输入-100，完成一个载荷的添加。

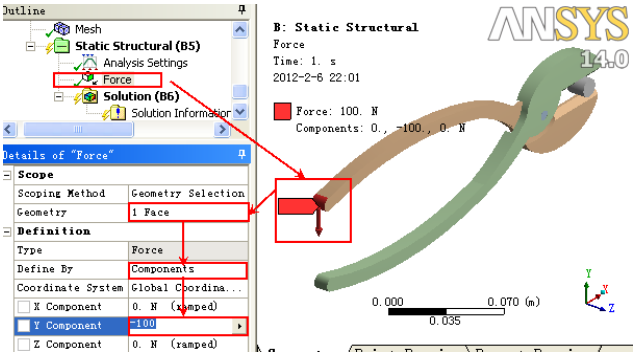


图 10-31　施加载荷（一）

Step4：与以上设置方法相同，设置另外一个手柄的载荷，方向沿着 *Y* 轴向上，如图 10-32 所示。

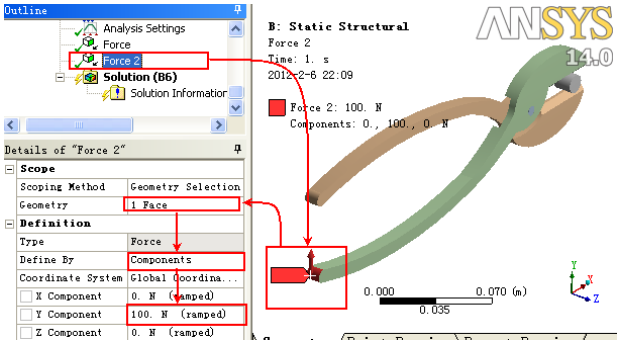


图 10-32　施加载荷（二）

Step5：在 Outline（分析树）中的 Static Structural（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 10-33 所示。

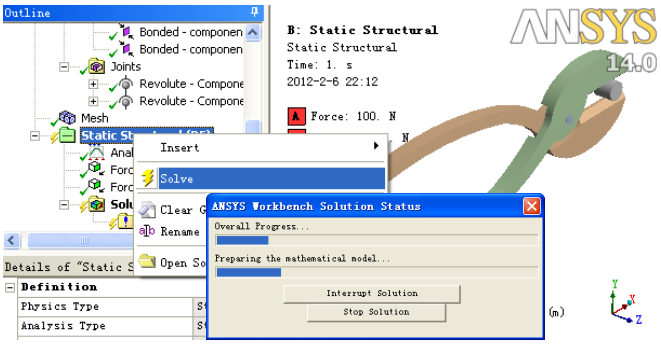


图 10-33　求解

10. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 10-34 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 10-35 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

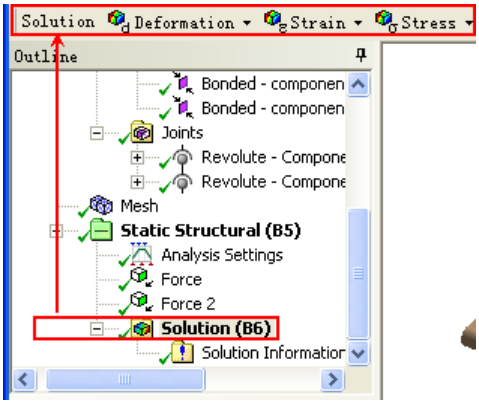


图 10-34　Solution 工具栏

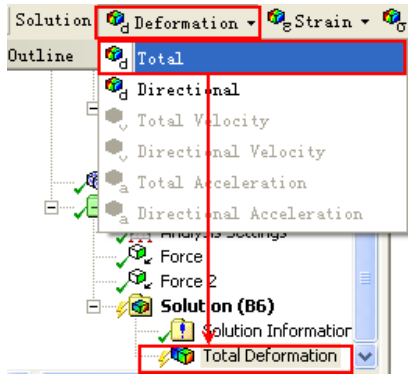


图 10-35　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 10-36 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 10-37 所示的总变形分析云图。

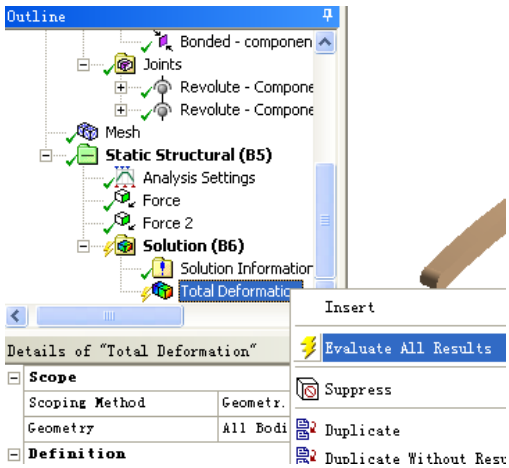


图 10-36　快捷菜单

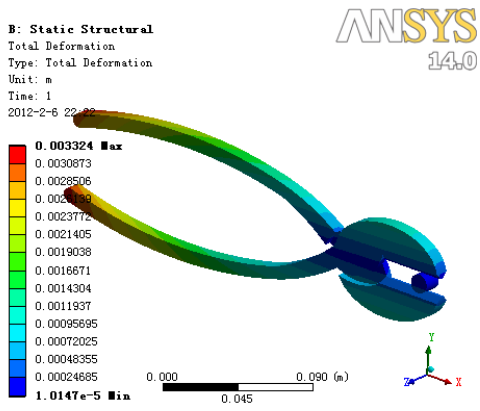


图 10-37　总变形

Step5：同样的操作方法，查看应力分布云图，如图 10-38 所示。

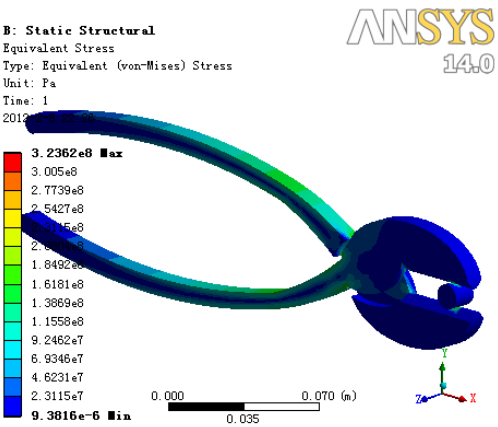


图 10-38　应力分布云图

11. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 10-39 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

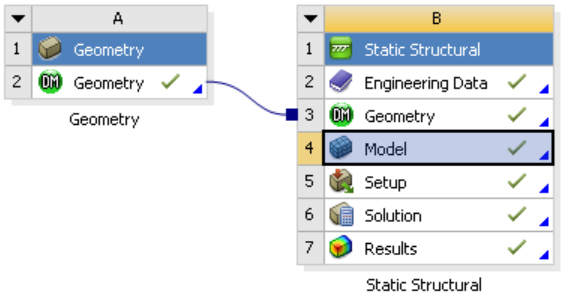


图 10-39　项目管理区中的分析项目

10.3 项目案例 2——装配体接触分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的接触分析功能，计算转配体的应力分布。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 接触设置及求解的方法及过程。

模型文件	光盘\model\assemb.stp
结果文件	光盘\example\assemb_contact.wbpj

1. 问题描述

如图 10-40 所示为某装配体模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算装配体下端四个孔固定约束，当在顶端面上施加 100N 水平力作用下的变形及应力分布。模型为对称结构，为简化分析，取出一半模型进行分析。

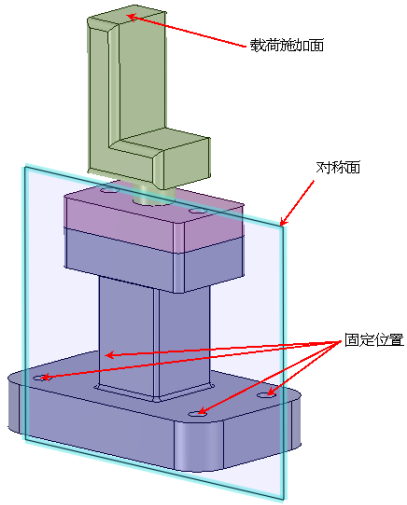


图 10-40　夹剪模型

2. 启动 Workbench 软件

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 10-41 所示。

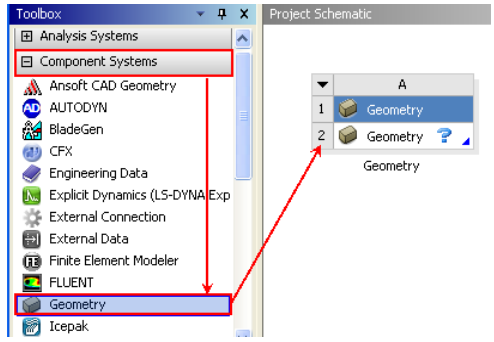


图 10-41　创建分析项目 A

3. 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 10-42 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 assemb.stp 几何体文件，如图 10-43 所示，此时 A2Geometry 后的 变为，表示实体模型已经存在。

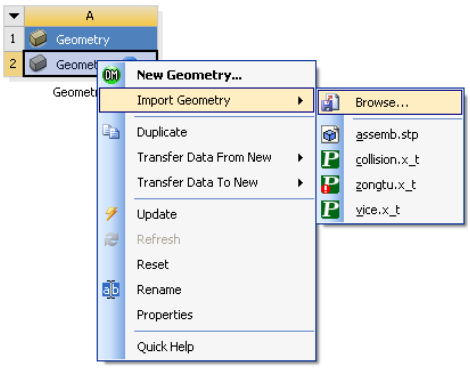


图 10-42　导入几何体

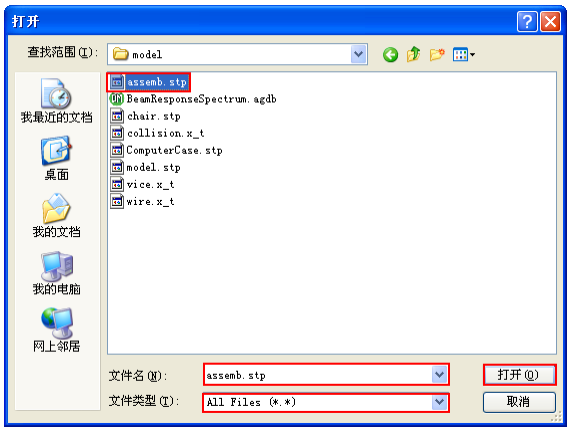


图 10-43　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry 选项，此时会进入 DesignModeler 界面，在弹出的“单位设置”对话框选择 Millimeter 选项，单击 OK 按钮。此时设计树中 Import1 前显示，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 10-44 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 10-45 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

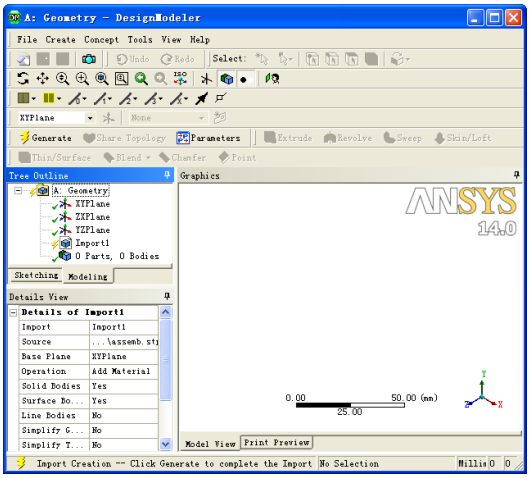


图 10-44　生成前的 DesignModeler 界面

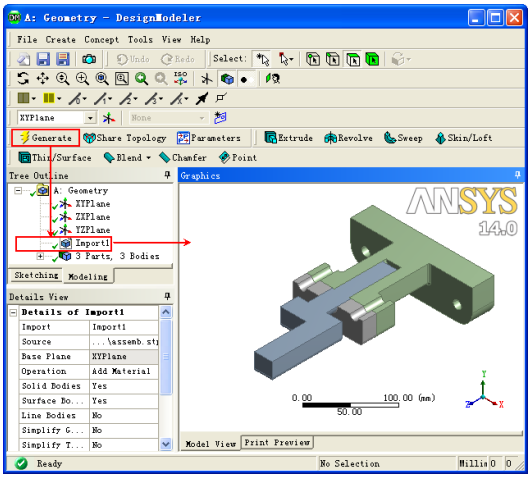


图 10-45　生成后的 DesignModeler 界面

Step5：单击工具栏中的图标，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 assemb_contact，并单击“保存”按钮。

Step6：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

4. 创建分析项目

Step1：如图 10-46 所示，在 Workbench 主界面的 Toolbox（工具箱）→Analysis Systerms 中选择 Static Structural（静态结构分析）选项，并直接拖曳到项目 A 的 A2（Geometry）栏中。

Step2：此时会出现如图 10-47 所示的项目 B，同时在项目 A 的 A2（Geometry）与项目 B 的 B2（Geometry）之间出现一条连接线，此时说明数据在项目 A 与项目 B 之间实现共享。

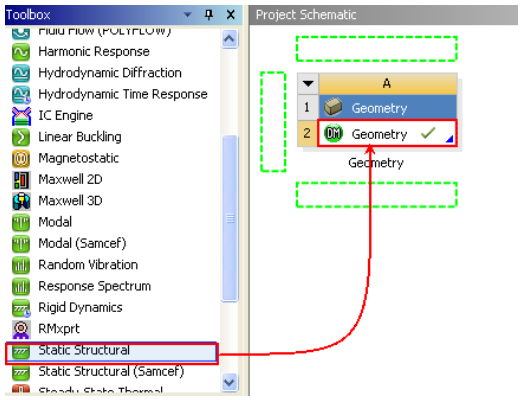


图 10-46　创建项目

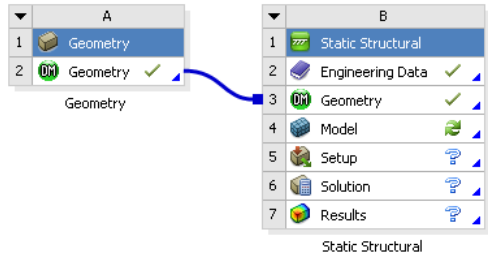


图 10-47　项目数据共享

5. 添加材料库

Step1：双击项目 B 中的 B2Engineering Data 选项，进入如图 10-48 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

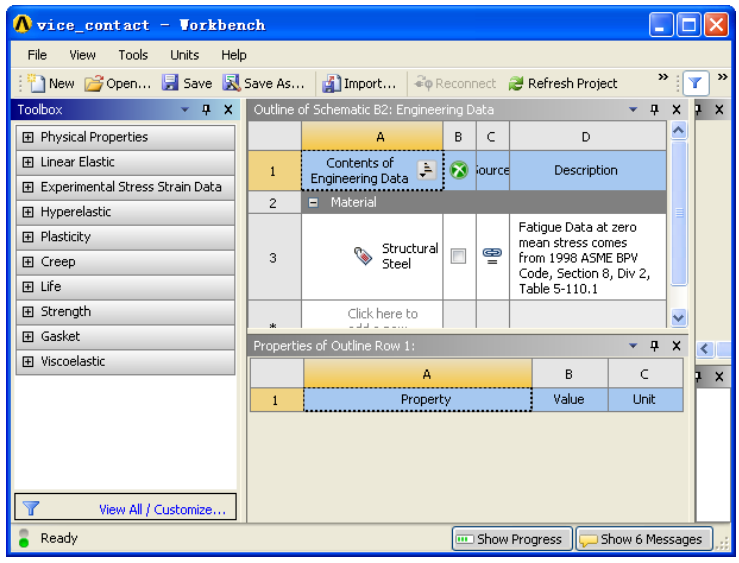


图 10-48　材料参数设置界面（一）

Step2：在界面的 A1 表中右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 10-49 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

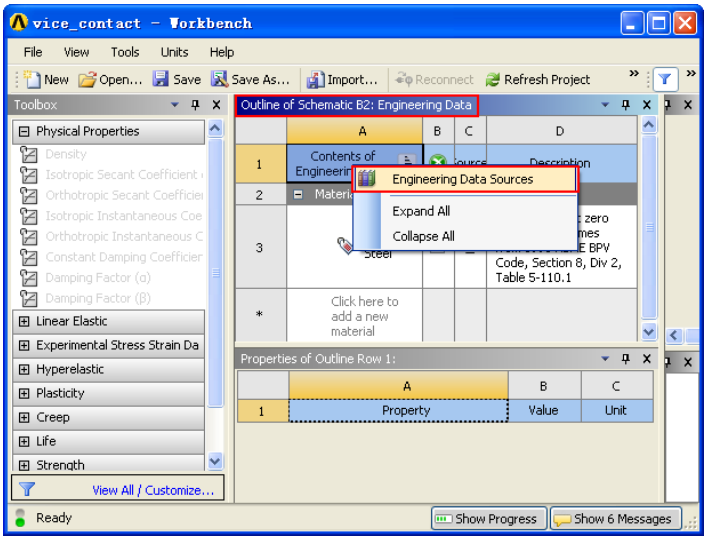


图 10-49　材料参数设置界面（二）

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A5 栏 Aluminium Alloy（铝合金）后的 B5 栏的（添加）按钮，此时在 C5 栏中会显示（使用中的）标识，如图 10-50 所示，标识材料添加成功。

Step4：同步骤 Step2，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 10-51 所示，本实例采用的是默认值。

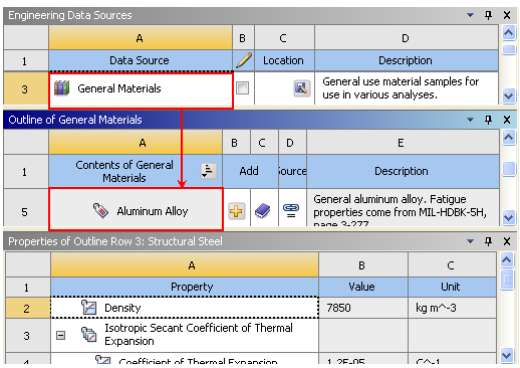


图 10-50　添加材料

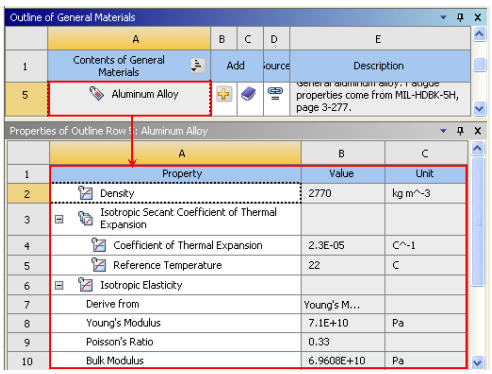


图 10-51　材料参数修改窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

6. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B4 栏 Model 选项，进入如图 10-52 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

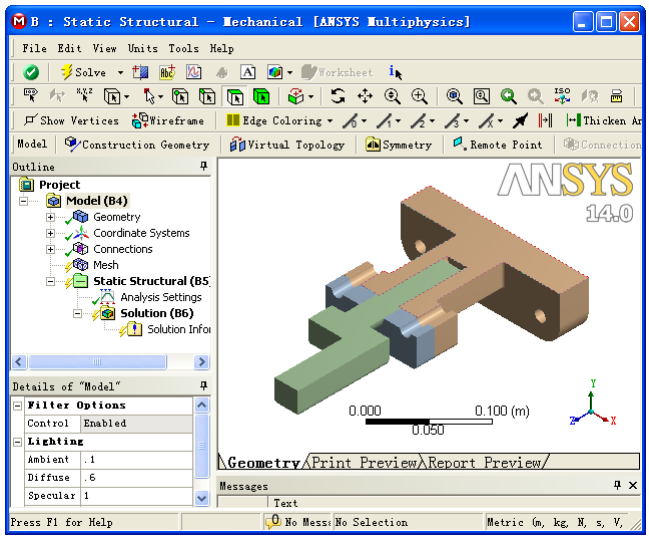


图 10-52　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outlines（分析树）中 Geometry 选项下的 jaw1，此时即可在 Details of "jaw1"（参数列表）中给模型添加材料，如图 10-53 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 后的按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Aluminium Alloy，选择即可将其添加到模型中去。其余模型采用默认的即可。

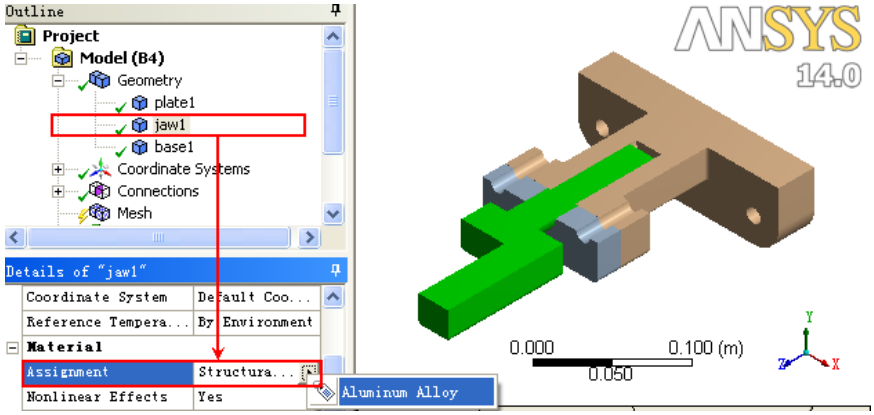


图 10-53　修改材料属相

7. 创建接触

Step1：右击 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Connections→Contact 命令，如图 10-54 所示，在弹出的快捷菜单中选择 Delete 命令，删除默认的接触设置。

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Connections 选项，此时会弹出如图 10-55 所示的 Connections 工具栏。

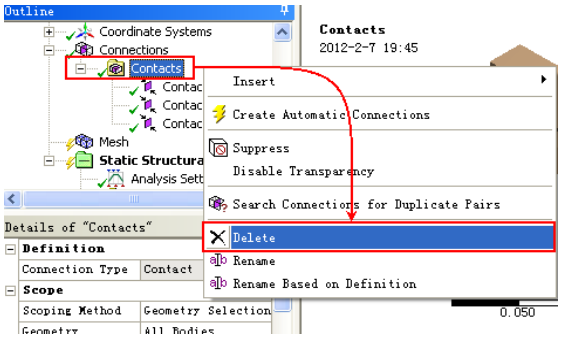


图 10-54　删除默认设置

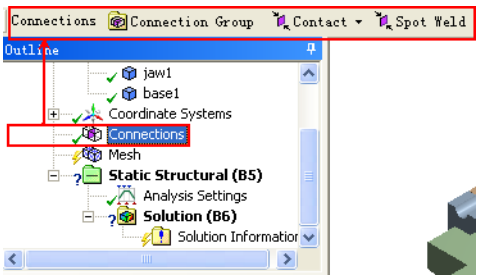


图 10-55　接触工具栏

Step3：选择 Connections 工具栏中的 Contact→Frictional 命令，如图 10-56 所示，此时在 Connections 下面出现一个？ Frictional - base1 To No Selectic 图标，表示接触还未被设置。

Step4：选择 base1 实体的内表面，如图 10-57 所示，在 Details of "Frictional"面板下面的 Scope→Contact 中单击 Apply 按钮。

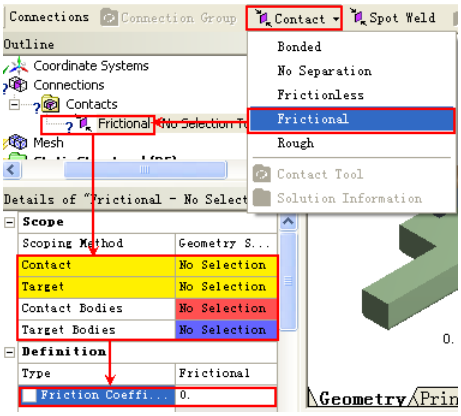


图 10-56　添加接触设置

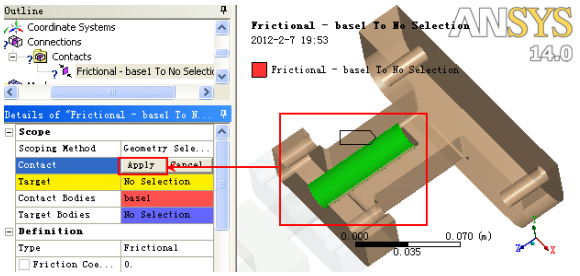


图 10-57　设置接触面（一）

Step5：选择 Outline 中的 Project→Model（B4）→Geometry 命令，然后单击工具栏中的 按钮，使其被选中，单击如图 10-58 所示的面。

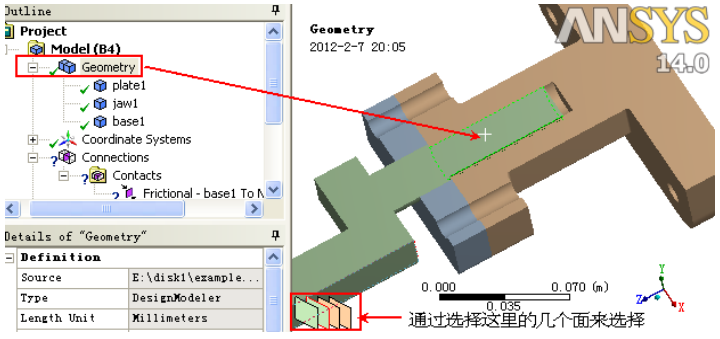


图 10-58　设置接触面（二）

Step6：选择 Outline 中的 Connections→Contact→Frictional 命令，如图 10-59 所示，在 Details of “Frictional”面板下面的 Target 中单击 Apply 按钮，在 Definition→Friction Coefficient（摩擦因数）栏中输入 0.17，完成第一个接触面的设置。

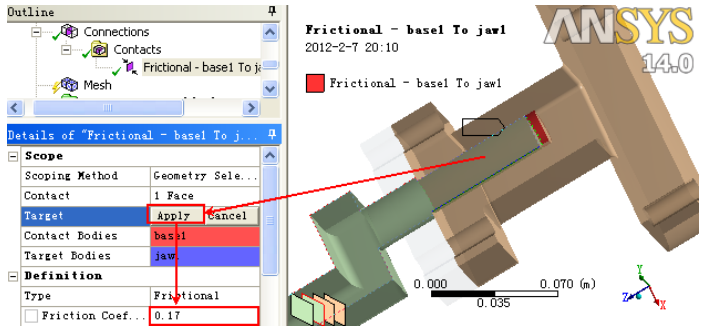


图 10-59　接触对设置（一）

Step7：与以上操作相同，请读者自己完成另外一对接触对的设置，设置完成后的接触对如图 10-60 所示。

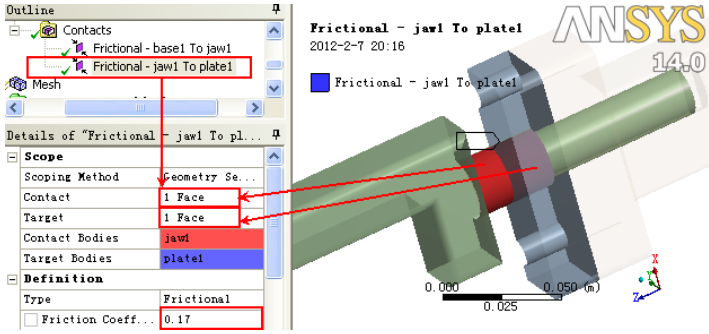


图 10-60　接触对设置（二）

Step8：选择 Connections 工具栏中的 Contact→Bonded 命令，如图 10-61 所示，此时在 Connections 下面出现一个 Bonded - No Selection To No Se 图标，表示接触还未被设置。

Step9：如图 10-62 所示，在绘图区域选择其中一个模型，右击后在弹出的快捷菜单中选择 Hide All Other Bodies 命令，隐藏其他模型。

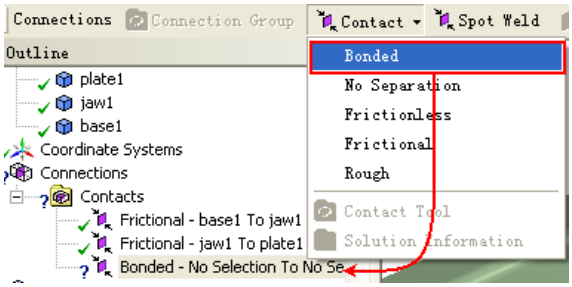


图 10-61　接触设置

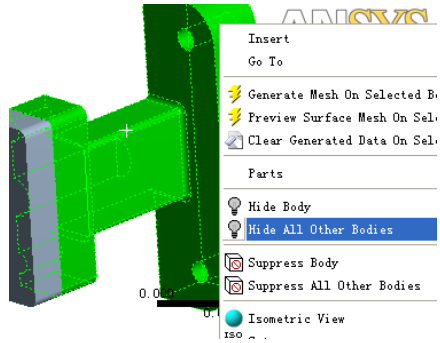


图 10-62　隐藏命令

Step10：如图 10-63 所示，保持 Bonded - No Selection To No Se选项被选中，选择实体内侧面，然后在 Details of “Bonded”面板中的 Scope→Contact 中单击 Apply 按钮，确定选择。

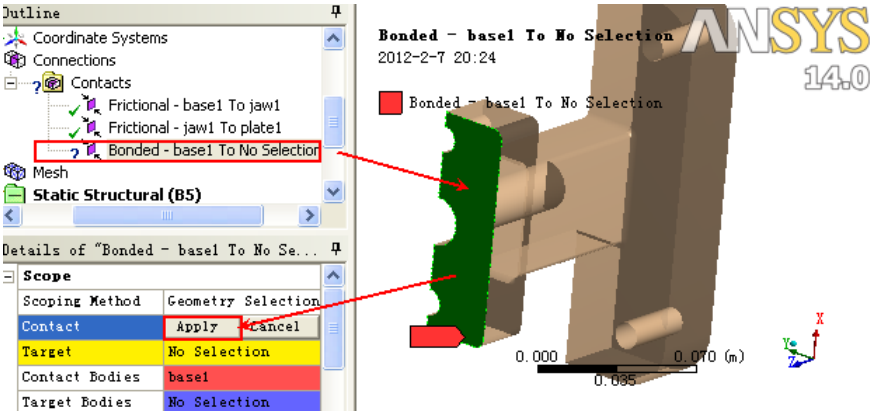


图 10-63　接触对设置（三）

Step11：右击 Outline 中的 Project→Model（B4）→Geometry→plate1 命令，在弹出的快捷菜单中选择 Hide All Other Bodies 命令，隐藏其他模型。

Step12：如图 10-64 所示，选择小圆柱外表面，然后单击 Bonded - No Selection To No Se 图标，在 Details of “Bonded”面板中的 Scope→Target 中单击 Apply 按钮，确定选择。

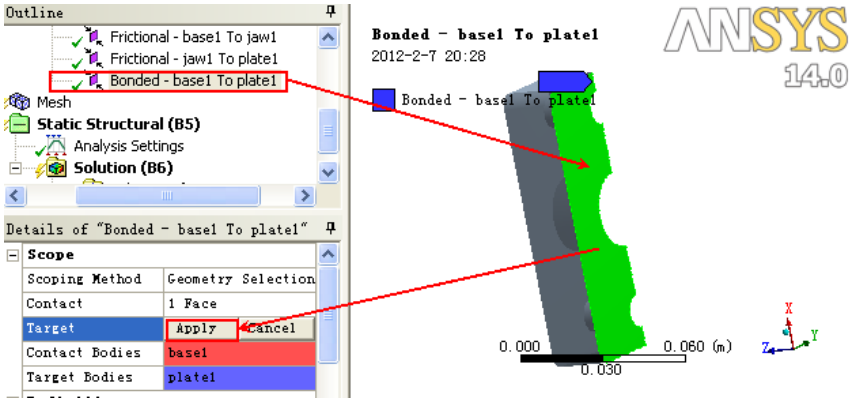


图 10-64　接触对设置（四）

8. 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，如图 10-65 所示，在 Sizing 中的 Relevance Center 中设置为 Fine，在 Element Size 中输入 0.005m，其余采用默认设置。

Step2：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 10-65 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 10-66 所示。

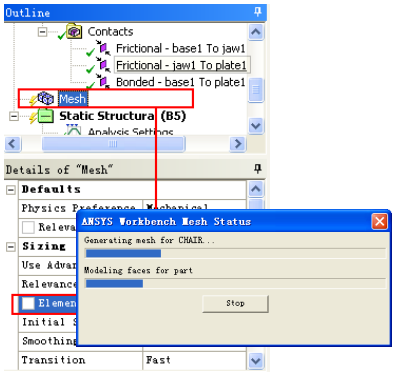


图 10-65　生成网格

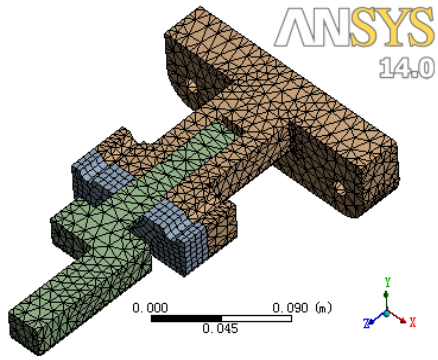


图 10-66　网格效果

9. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural （B5）选项，此时会出现如图 10-67 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Force（力）命令，此时在分析树中会出现 Force 选项，如图 10-68 所示。

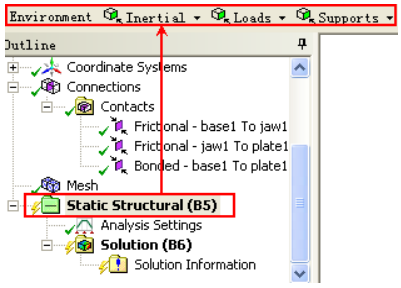


图 10-67　Environment 工具栏

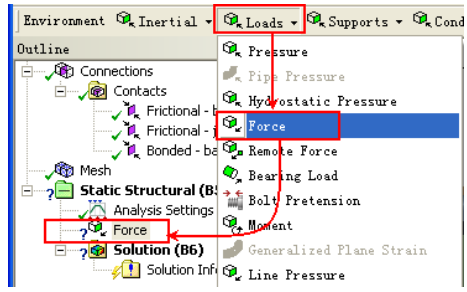


图 10-68　添加载荷

Step3：如图 10-69 所示，选择 Force 选项，选择需要施加载荷的面，单击 Details of "Force"中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，在 Definition→Define By 中选择 Component 选项，在 X-Component 中输入 1000，完成一个载荷的添加。

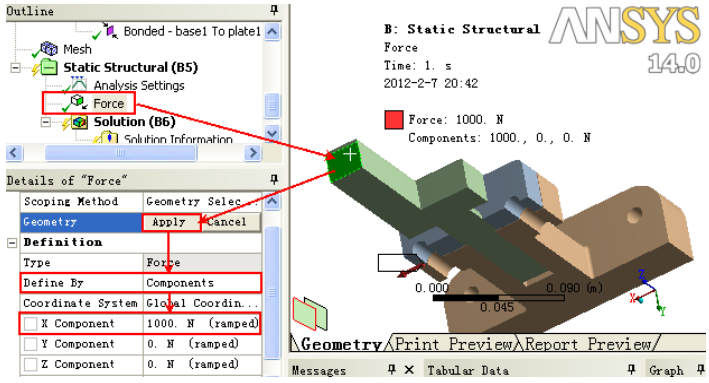


图 10-69　施加载荷

Step4：选择 Environment 工具栏中的 Support（支撑）→Fixed Support（固定）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 10-70 所示。

Step5：按住键盘 Ctrl 键，点选如图 10-71 所示的两个圆孔，共四个面，在 Details of “Fixed Support”面板中的 Scope→Geometry 中单击 Apply 按钮，确定选择。

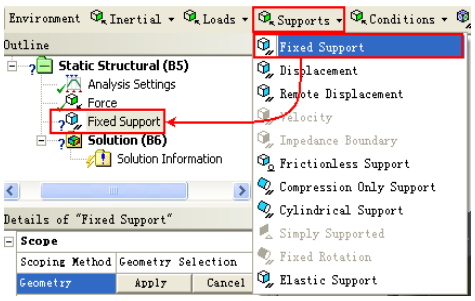


图 10-70　添加约束

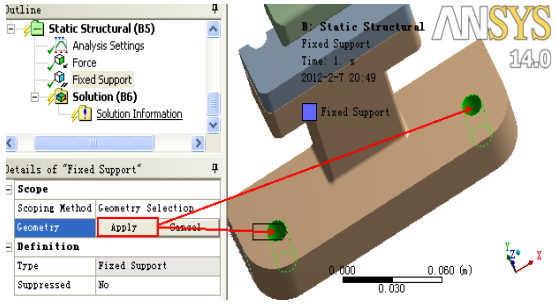


图 10-71　施加约束

Step6：按住键盘 Ctrl 键，选择如图 10-72 所示的所有对称面。

Step7：如图 10-73 所示，选择 Environment 工具栏中的 Supports（支撑）→Frictionless Support 命令，此时被选中的面已经被设置成 Frictionless Support。

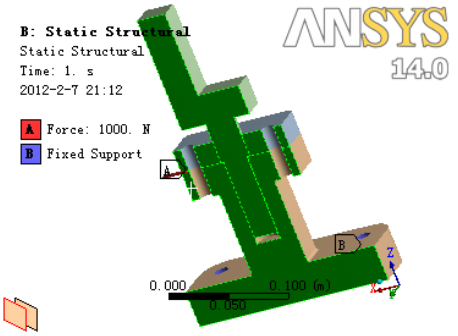


图 10-72　对称面选择

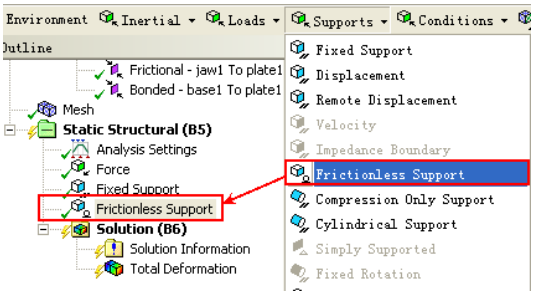


图 10-73　对称约束

Step8：在 Outline（分析树）中的 Static Structural （B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 10-74 所示。

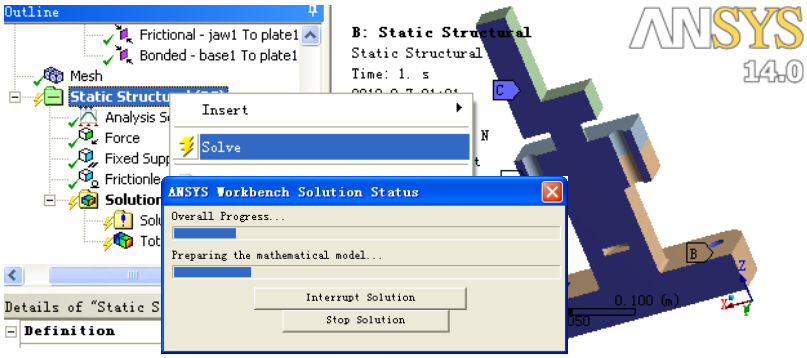


图 10-74　求解

10. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 10-75 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 10-76 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

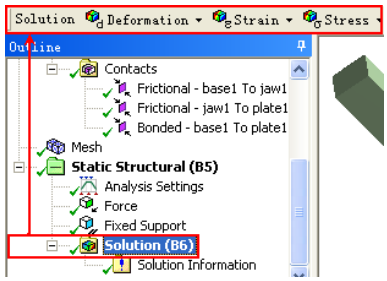


图 10-75　Solution 工具栏

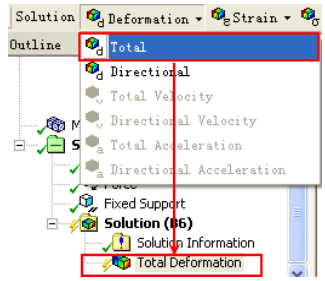


图 10-76　添加变形选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 10-77 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 10-78 所示的总变形分析云图。

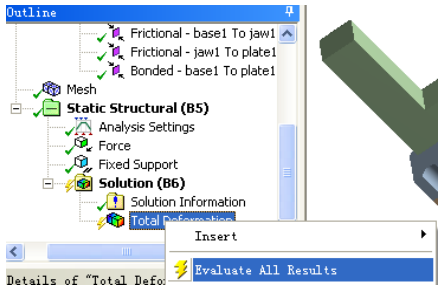


图 10-77　快捷菜单

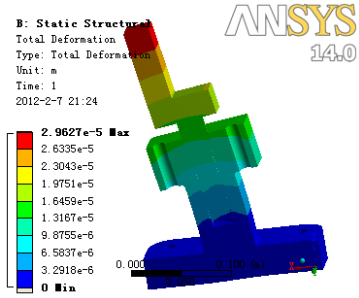


图 10-78　总变形

Step5：用同样的操作方法，查看应力分布云图，如图 10-79 所示。

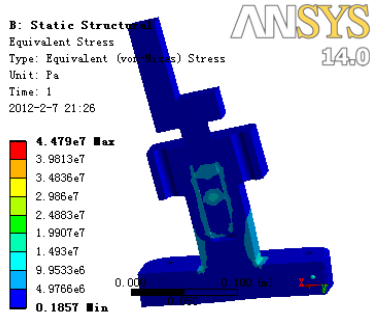


图 10-79　应力分布云图

11. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 10-80 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

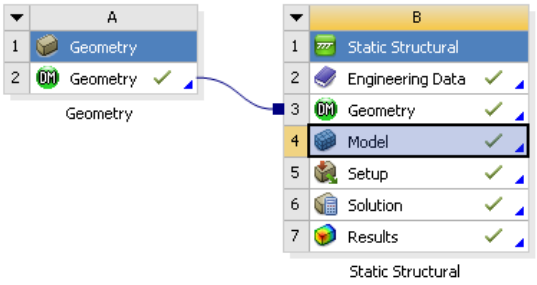


图 10-80　项目管理区中的分析项目

10.4 本章小结

本章节详细地介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件接触分析功能，包括几何导入、网格划分、接触设置、边界条件设定、后处理等操作。

通过本章节的学习，读者应该对接触分析的过程有详细的了解。

第 11 章

线性屈曲分析及实例详解

本章将对 ANSYS Workbench 软件的线性屈曲分析模块进行详细讲解，并通过几个典型案例对线性屈曲分析的一般步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置与划分、边界条件的设定、后处理操作。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 软件线性屈曲分析的过程。

（2）了解线性屈曲分析与其他分析的不同之处。

（3）了解线性屈曲分析的应用场合。

11.1 线性屈曲分析简介

许多结构都需要进行结构稳定性计算，如细长柱、压缩部件、真空容器等。这些结构件在不稳定（屈曲）开始时，结构在本质上没有变化的载荷作用下（超过一个很小的动荡）在 x 方向上的微小位移会使得结构有一个很大的改变。

1. 屈曲分析

特征值或线性屈曲分析预测的是理想线弹性结构的理论屈曲强度（分歧点）；而非理想和非线性行为阻止许多真实的结构达到它们理论上的弹性屈曲强度。

线性屈曲通常产生非保守的结果，但是线性屈曲有以下特点。

- 它比非线性屈曲计算更节省时间，并且应当作第一步计算来评估临界载荷（屈曲开始时的载荷）。
- 线性屈曲分析可以用来作为决定产生什么样的屈曲模型形状的设计工具，为设计做指导。

2. 线性屈曲分析

线性屈曲分析一般方程为

$$([\boldsymbol{K}]+\boldsymbol{\lambda}_i[\boldsymbol{S}]\{\boldsymbol{\psi}_i\}=\boldsymbol{0} \tag{11-1}$$

式中，$[\boldsymbol{K}]$和$[\boldsymbol{S}]$是常量；$[\boldsymbol{\lambda}_i]$是屈曲载荷乘子；$\{\boldsymbol{\psi}_i\}$是屈曲模态。

ANSYS Workbench 14.0 屈曲模态分析步骤与其他有限元分析步骤大同小异，软件支持在模态分析中存在接触对，但是由于屈曲分析是线性分析，所以接触行为不同于非线性接触行为，见表 11-1。

表 11-1　存在接触设置的线性屈曲分析设置

Contact Type	Linear Buckling Analysis		
	Initially Touching	Inside Pinball Region	Outside Pinball Region
Bonded	Bonded	Bonded	Free
No Separation	No Separation	No Separation	Free
Rough	Bonded	Free	Free
Frictionless	No Separation	Free	Free

下面通过几个实例简单介绍一下线性屈曲分析的操作步骤。

11.2 项目案例 1——钢管屈曲分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的屈曲分析模块，计算钢管在外载荷作用下的稳定性及屈曲因子。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 屈曲分析的的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	光盘\example\Pipe_Bukling.wbpj

1. 问题描述

如图 11-1 所示为某钢管模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算钢管在 1MPa 压力下的屈曲响应情况。



图 11-1　钢管模型

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→ Static Structural（静态结构分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 11-2 所示。

3. 创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上双击，此时会弹出如图 11-3 所示的 DesignModeler 软件窗口，选择 Meter 选项，然后单击 OK 按钮。

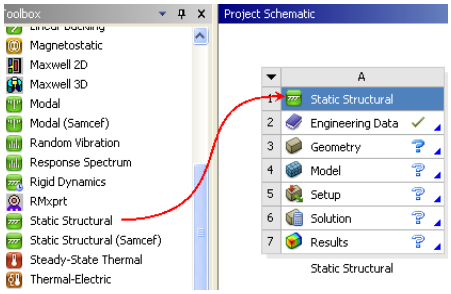


图 11-2　创建分析项目 A

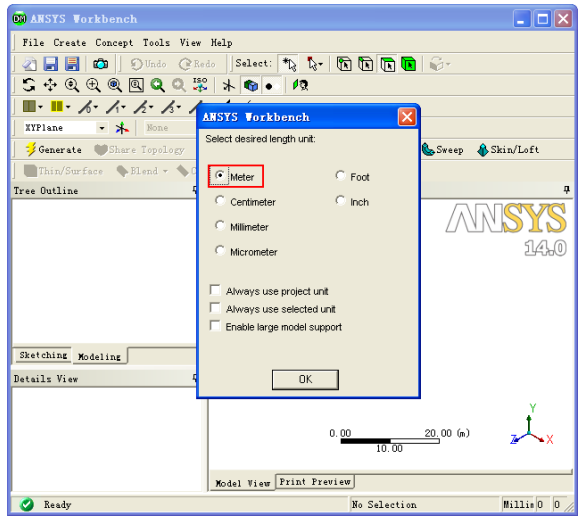


图 11-3　创建几何体

Step2：如图 11-4 所示，单击 ZXPlane 命令选择绘图平面，然后再单击 按钮，使得绘图平面与绘图区域平行。

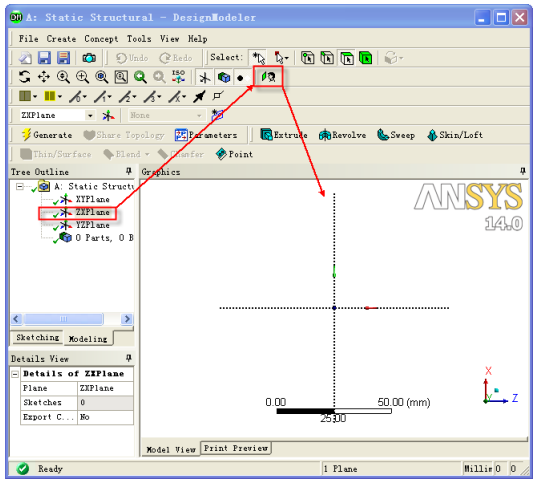


图 11-4　选择绘图平面

Step3：在 Tree Outline 下面单击 Sketching 选项卡，此时会出现如图 11-5 所示的 Sketching Toolboxes（草绘工具箱），草绘所有命令都在 Sketching Toolboxes（草绘工具箱）中。

Step4：单击 Circle（圆）按钮，此时按钮变成凹陷状态，表示本命令已被选中，将鼠标移动到绘图区域中的原点上，此时会出现一个 P 提示符，表示创建圆形的圆心在坐标中心上，如图 11-6 所示。

Step5：当出现 P 提示符后，单击在中心创建圆心，然后向上移动鼠标创建如图 11-7 所示的圆形。

Step6：重复上述步骤创建一个同心圆如图 11-8 所示。

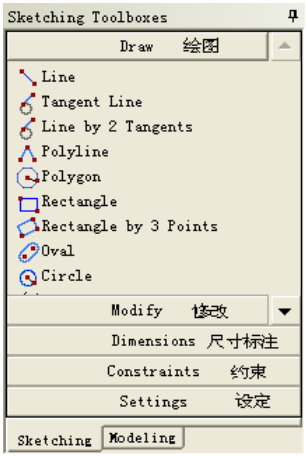


图 11-5　草绘工具箱

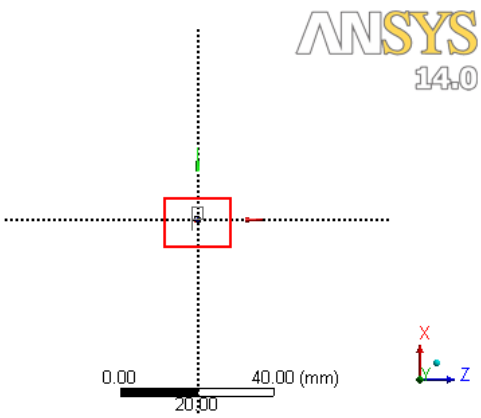


图 11-6　草绘

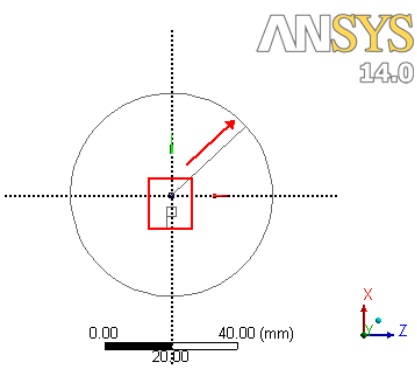


图 11-7　坐标原点提示符

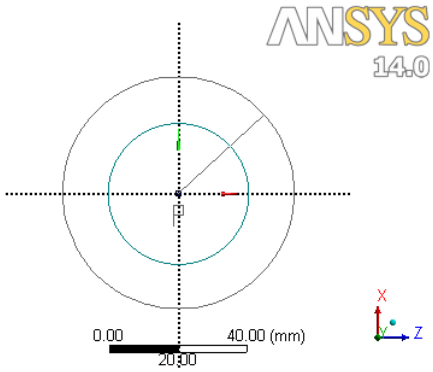


图 11-8　创建圆

Step7：选择 Dimensions→Diameter 命令，创建如图 11-9 所示的两个直径标注，在 D1 栏中输入 30mm，在 D2 栏中输入 50mm。

Step8：单击工具栏中的Extrude拉伸按钮，如图 11-10 所示，在 Details View 面板中 Geometry 确定 Sketch1 被选中，在 Depth 栏中输入拉伸长度为 1000mm，然后单击工具栏中的Generate按钮，生成几何模型。

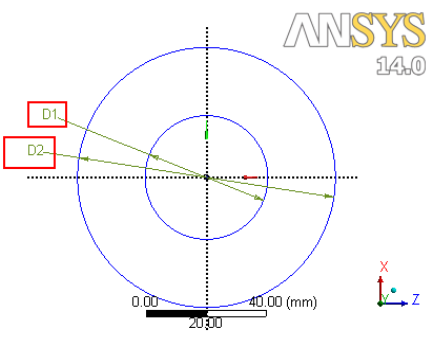


图 11-9　标注

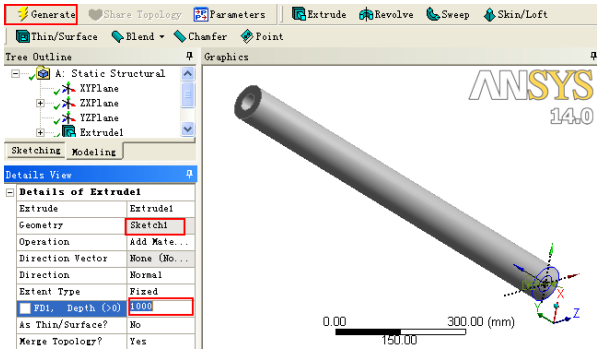


图 11-10　拉伸

Step9：单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成。

4. 设置材料

本案例选用默认材料，即 Structural Steel。

5. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏 Model 选项，进入如图 11-11 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

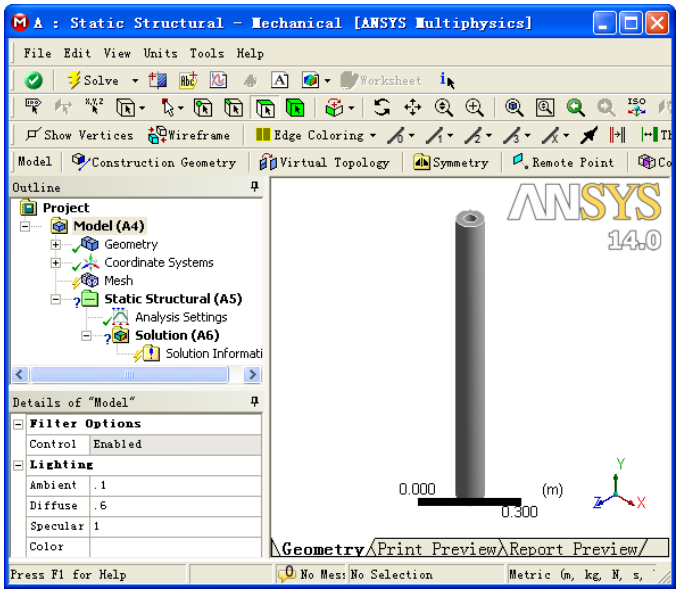


图 11-11　Mechanical 界面

Step2：如图 11-12 所示，此时 Structural Steel 材料已经被自动赋予模型。

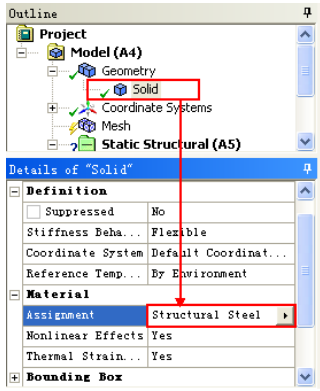


图 11-12　添加材料

6. 划分网格

Step1：如图 11-13 所示，右击 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Mapping Face Meshing 命令。

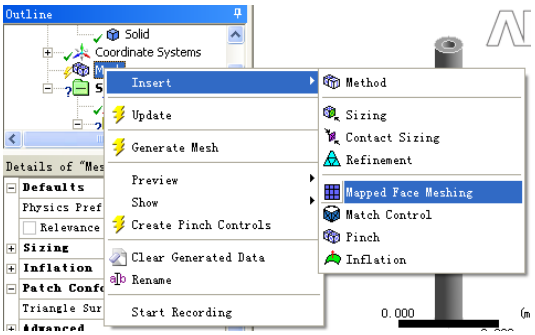


图 11-13　生成网格

Step2：如图 11-14 所示，在出现的 Details of "Mapping Face Meshing"面板中做如下设置。

① 选择模型上表面单击 Geometry 栏中的 Apply 按钮。

② 在 Radial Number 栏中输入 10。

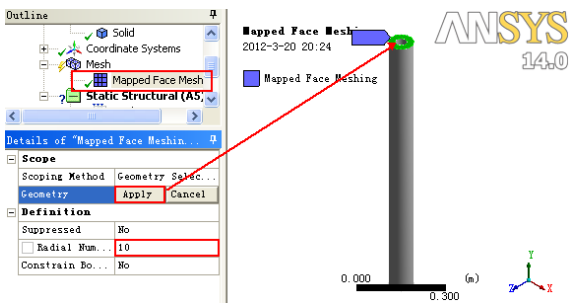


图 11-14　设置面网格

Step3：如图 11-15 所示，右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Sizing 命令。

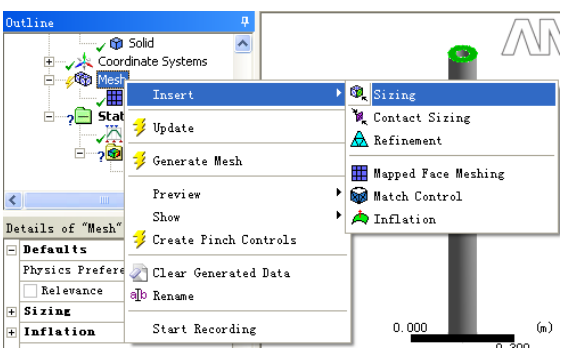


图 11-15　设置体网格（一）

Step4：如图 11-16 所示，在出现的 Details of Sizing 面板中做如下设置。

① 选择几何实体，然后在 Geometry 栏中单击 Apply 按钮。

② 在 Element Size 栏中输入网格大小为 1.e-002m。

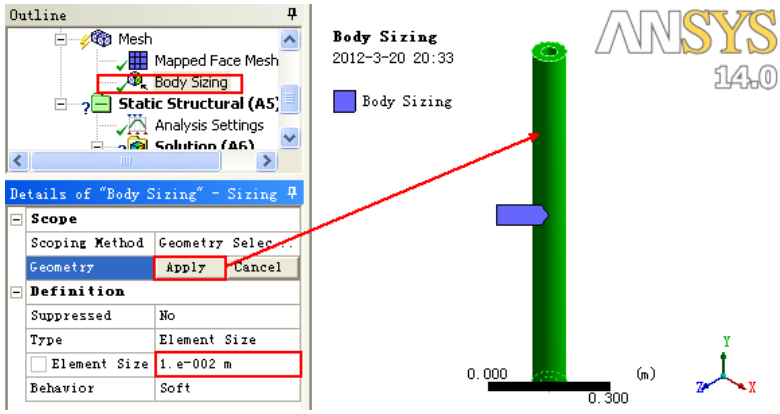


图 11-16　设置体网格（二）

Step5：如图 11-17 所示，右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step6：最终的网格效果如图 11-18 所示。

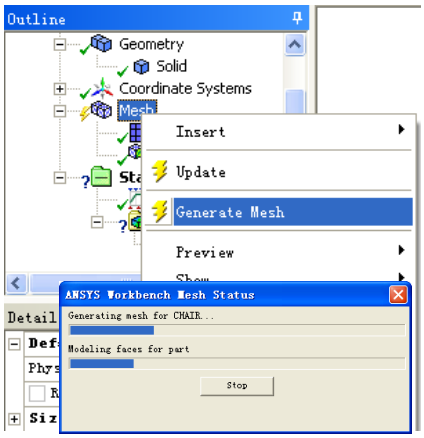


图 11-17　生成网格

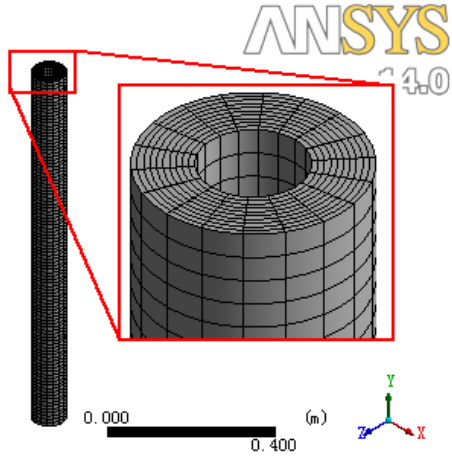


图 11-18　网格效果

7. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项，此时会出现如图 11-19 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 11-20 所示。

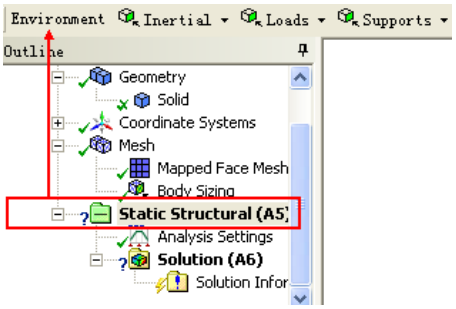


图 11-19　Environment 工具栏

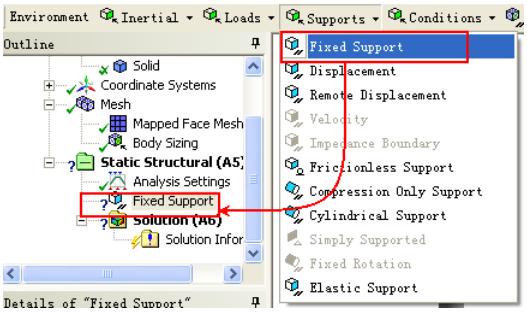


图 11-20　添加固定约束

Step3：选择 Fixed Support 选项，在工具栏中选择选择如图 11-21 所示的钢管底面，单击 Details of “Fixed Support”（参数列表）中 Geometry 选项下的Apply按钮，即可在选中面上施加固定约束。

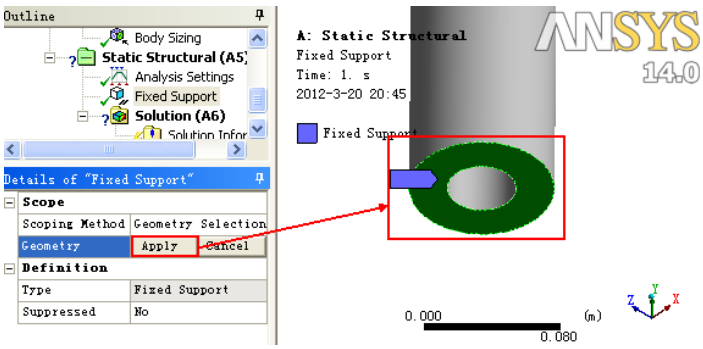


图 11-21　施加固定约束

Step4：如同 Step3 选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Pressure（压力）命令，此时在分析树中会出现 Pressure 选项，如图 11-22 所示。

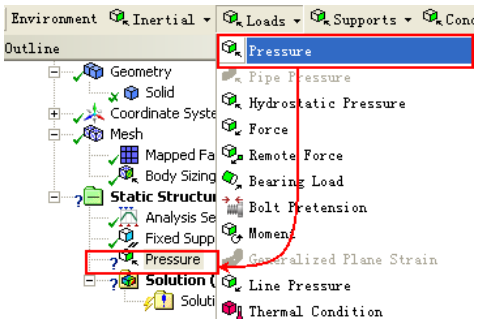


图 11-22　添加压力载荷

Step5：如同 Step3 选择 Pressure 选项，选择钢管上侧面，单击 Details of “Pressure”（参数列表）中 Geometry 选项下的Apply按钮，同时在 Define By 的 Magnitude 栏中输入 1.e+006Pa，如图 11-23 所示。

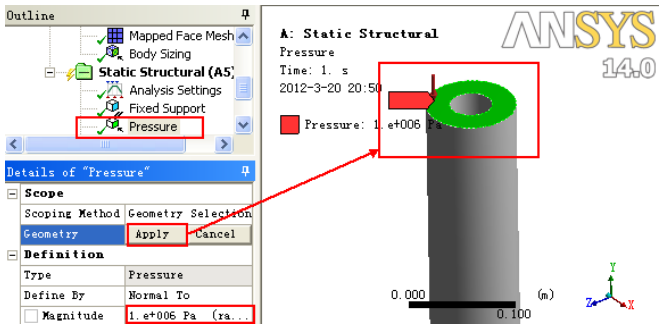


图 11-23　添加面载荷

Step6：在 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 11-24 所示。

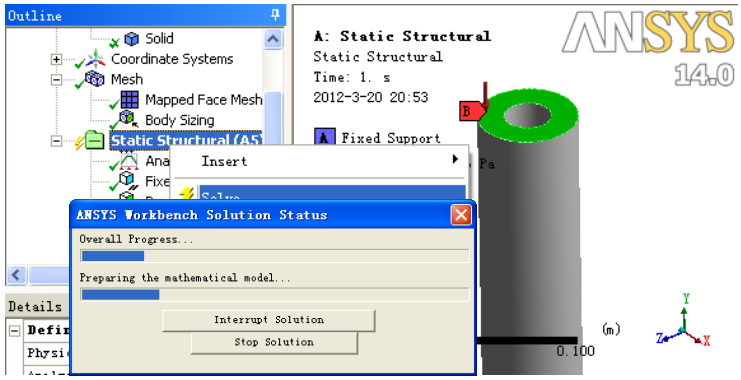


图 11-24　求解

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现如图 11-25 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 11-26 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

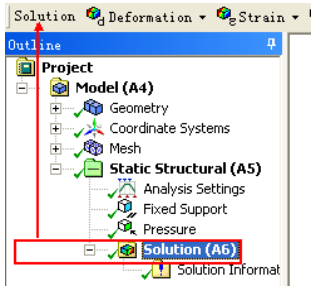


图 11-25　Solution 工具栏

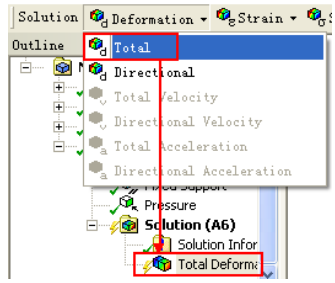


图 11-26　添加等效应力选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 11-27 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

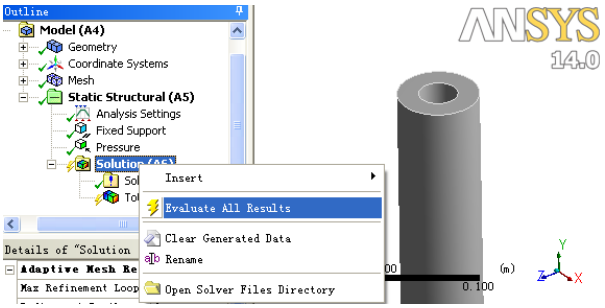


图 11-27　快捷菜单

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 11-28 所示的总变形分析云图。

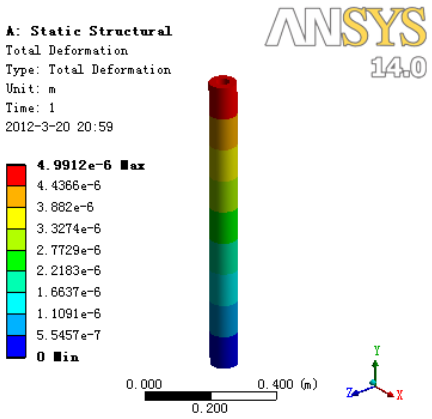


图 11-28　总变形云图

Step5：选择 Solution 工具栏中的 Stress→Equivalent（von-Mises）命令，如图 11-29 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项。

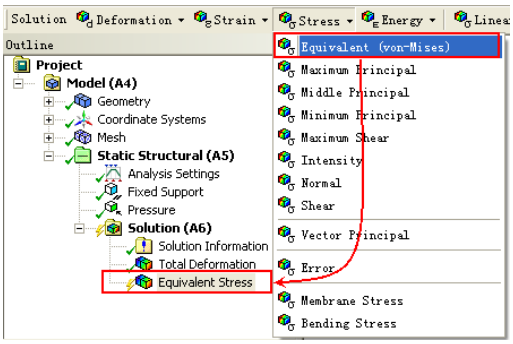


图 11-29　应力分析工具

Step6：同 Step3，在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 11-30 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step7：如图 11-31 所示为应力分析云图。

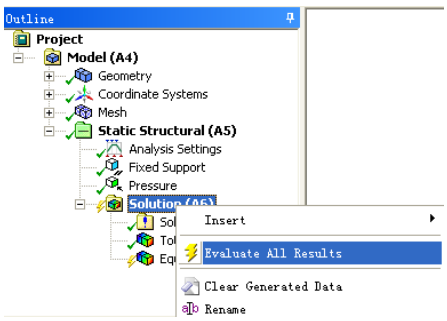


图 11-30　计算快捷菜单

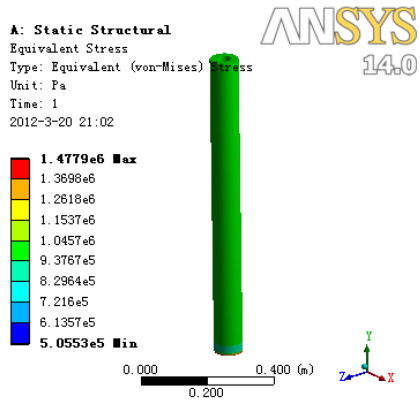


图 11-31　应力分布

9. 线性屈曲分析

Step1：如图 11-32 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Linear Buckling（线性屈曲分析）选项直接拖曳到项目 A（静力分析）的 A6Solution 中。

Step2：如图 11-33 所示，此时项目 A 的所有前处理数据已经全部导入项目 B 中，此时，如果双击项目 B 中的 B5Setup 选项即可直接进入 Mechanical 界面。

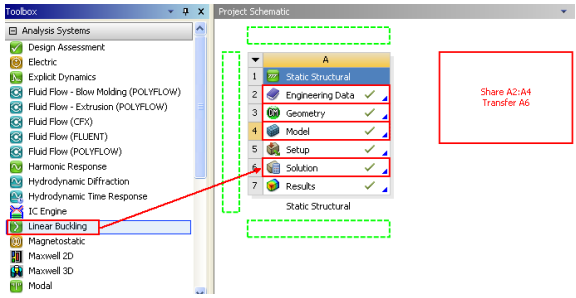


图 11-32　创建线性屈曲分析

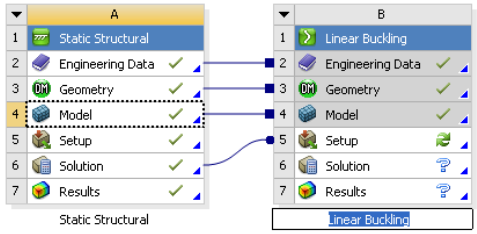


图 11-33　工程数据共享

10. 施加载荷与约束

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B5 栏 Setup 选项，进入如图 11-34 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

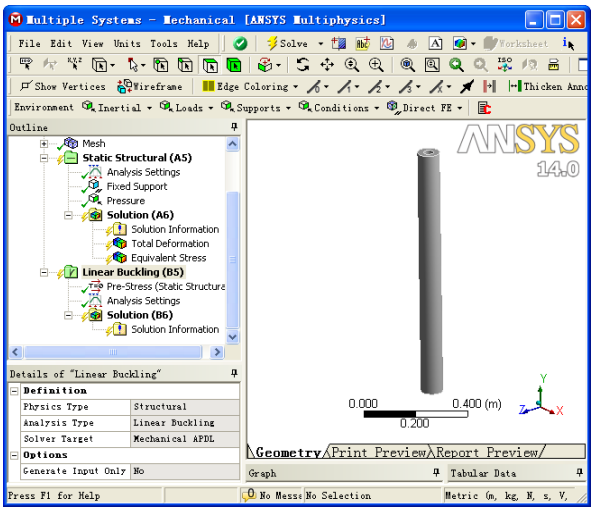


图 11-34　Mechanical 界面

Step2：如图 11-35 所示，在 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step3：如图 11-36 所示，在 Outline（分析树）中的 Linear Buckling（B5）→Analysis Settings 选项单击，在下面出现的 Details of “Analysis Settings”选项的 Options 中做如下更改。

在 Max Modes to Find 栏中输入 10，表示十阶模态将被计算。

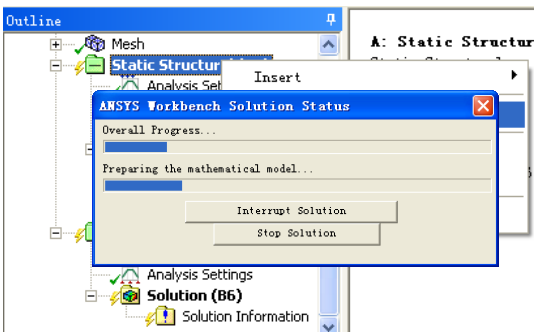


图 11-35　静力计算

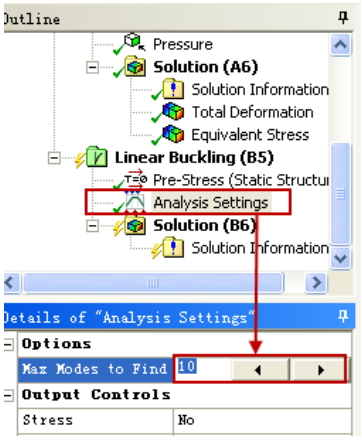


图 11-36　阶数设定

Step4：在 Outline（分析树）中的 Linear Buckling（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 11-37 所示。

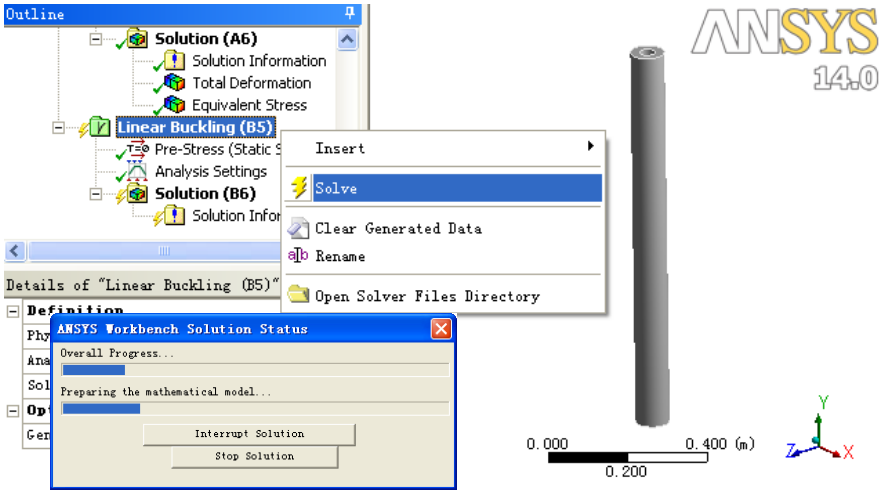


图 11-37　求解

11. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 11-38 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 11-39 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

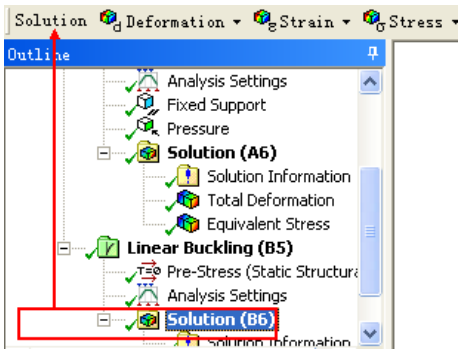


图 11-38　Solution 工具栏

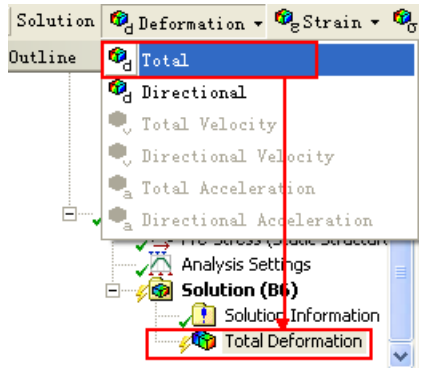


图 11-39　添加变形选项

Step3：选择 Solution 工具栏中的 Total Deformation（总变形）命令，在如图 11-40 所示的 Details of "Total Deformation"中的 Definition 中的 Mode 中输入 1。

Step4：如图 11-41 所示，右击 Solution 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，进行后处理计算。

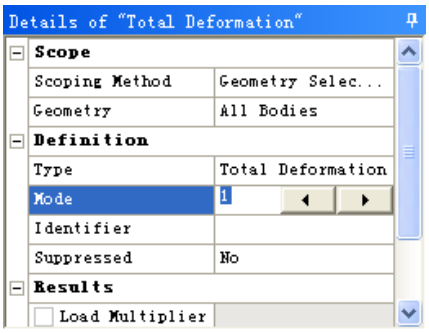


图 11-40　设置频率

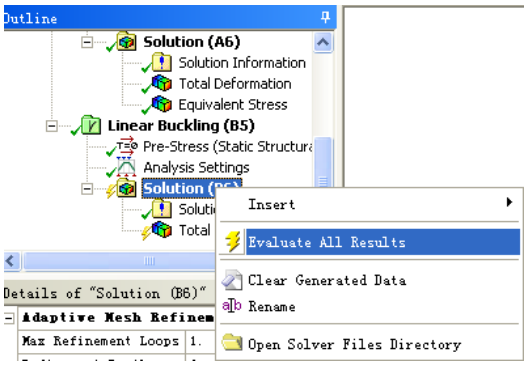


图 11-41　快捷菜单

Step5：图 11-42 所示为钢管的第一阶模态变形云图。

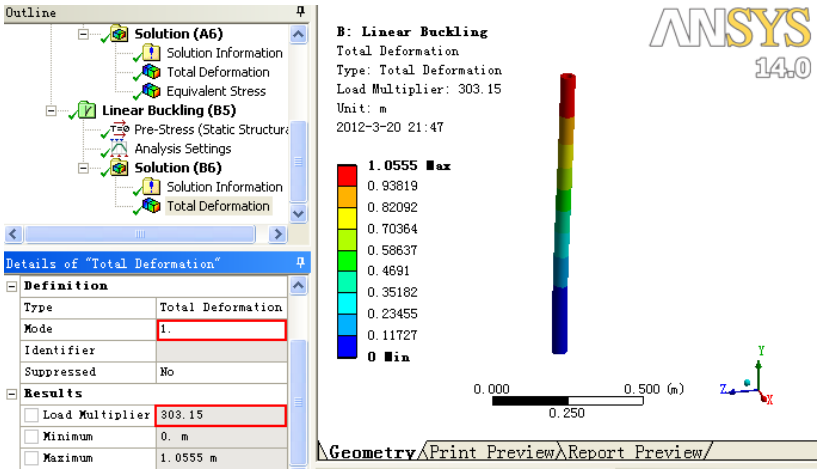


图 11-42　第一阶屈曲模态

从如图 11-42 所示的面板中可以查到第一阶屈曲载荷因子为 303.15，由于施加载荷为 1MPa，故可知钢管的的屈曲压力为 303.15×1＝303.15MPa，变形形状为右侧云图所示。

第一阶临界载荷为 303.15MPa，由于第一阶为屈曲载荷的最低值，因此这意味着在理论上，当压力达到 303.15MPa 时钢管将失稳。

12. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 11-43 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 Pipe_Buckling。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

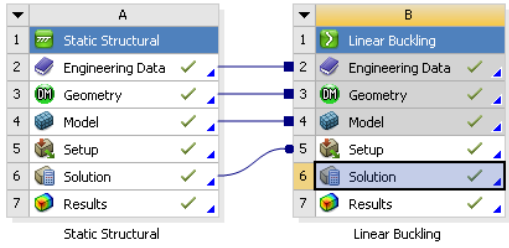


图 11-43　项目管理区中的分析项目

11.3 项目案例 2——金属容器屈曲分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的屈曲分析模块，计算金属容器在外载荷作用下的稳定性及屈曲因子。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 屈曲分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\
结果文件	光盘\example\Shell_Bukling.wbpj

1. 问题描述

如图 11-44 所示为某金属容器模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算金属容器在 1MPa 的压力下的屈曲响应情况。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0 →Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Static Structural（静态结构分析）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 11-45 所示。

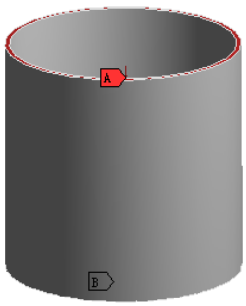


图 11-44　金属容器模型

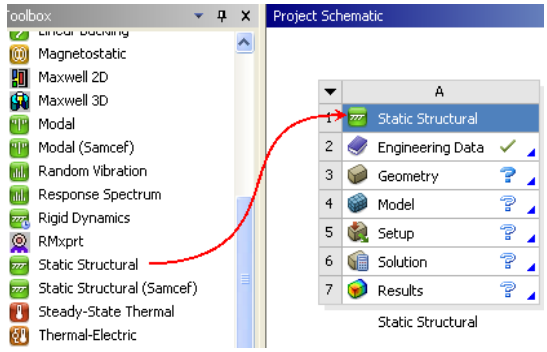


图 11-45　创建分析项目 A

3. 创建几何体

Step1：在 A3 Geometry 上双击，此时会弹出如图 11-46 所示的 DesignModeler 软件窗口，选择 Meter 选项，然后单击 OK 按钮。

Step2：如图 11-47 所示，选择 ZXPlane 选项选择绘图平面，然后再单击 按钮，使得绘图平面与绘图区域平行。

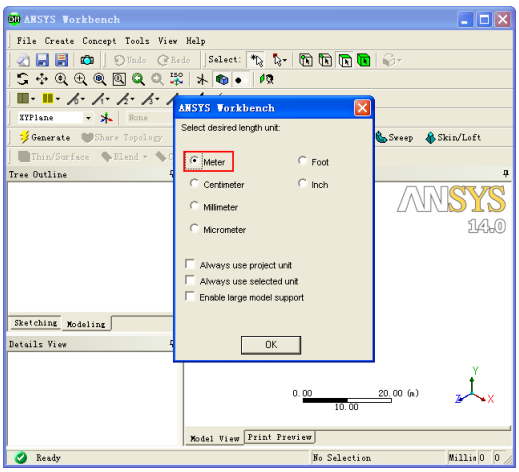


图 11-46　创建几何体

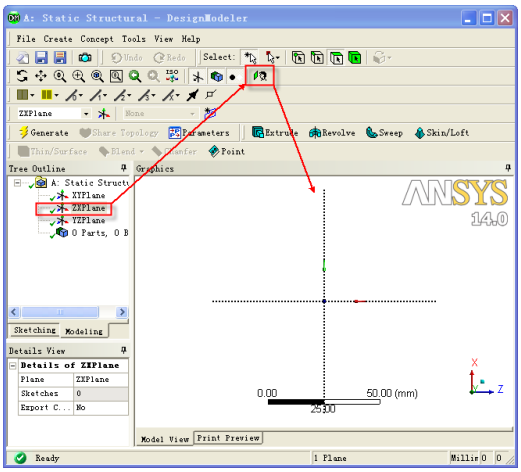


图 11-47　选择绘图平面

Step3：在 Tree Outline 下面单击 Sketching 选项卡，此时会出现如图 11-48 所示的 Sketching Toolboxes（草绘工具箱），草绘所有命令都在 Sketching Toolboxes（草绘工具箱）中。

Step4：单击 Circle（圆）按钮，此时按钮变成凹陷状态，表示本命令已被选中，将鼠标移动到绘图区域中的原点上，此时会出现一个 P 提示符，表示创建圆形的圆心在坐标中心上，如图 11-49 所示。

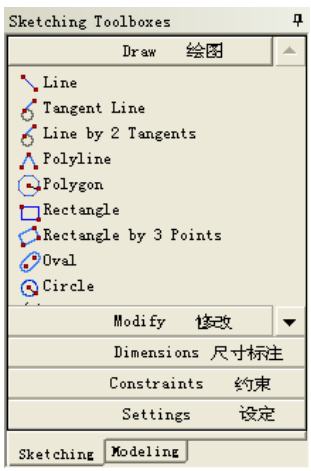


图 11-48　草绘工具箱

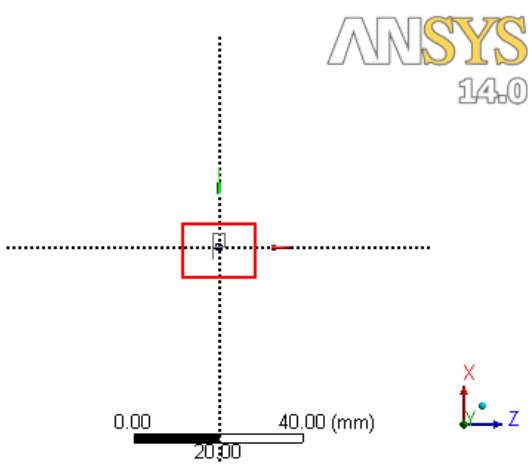


图 11-49　草绘

Step5：当出现 P 提示符后，单击在中心创建圆心，然后向上移动鼠标创建如图 11-50 所示的圆形。

Step6：选择 Dimensions→Diameter 命令，创建如图 11-51 所示的直径标注，在 *D*1 栏中输入 100mm。

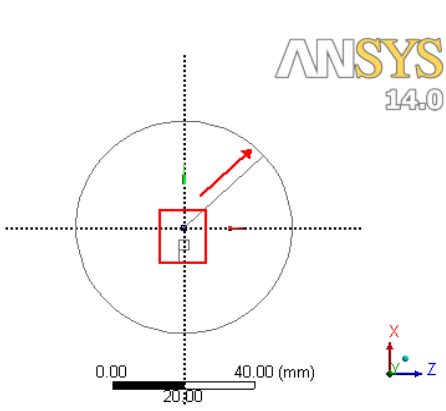


图 11-50　坐标原点提示符

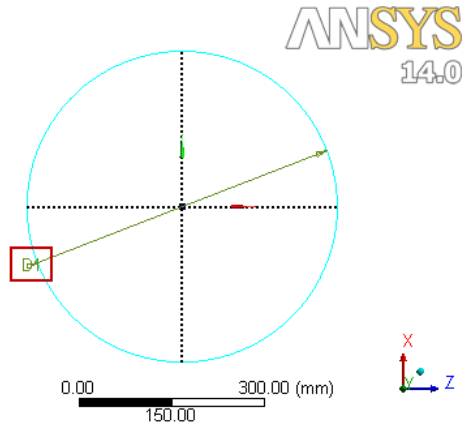


图 11-51　标注

Step7：单击工具栏中的Extrude拉伸按钮，如图 11-52 所示，在 Details View 面板中确保 Geometry 栏中的 Sketch1 被选中，在 Depth 栏中输入拉伸长度为 100mm，在 As Thin/Surf 栏中选择 Yes，在 FD2 和 FD3 栏中分别输入 1mm，然后单击工具栏中的Generate按钮，生成几何模型。

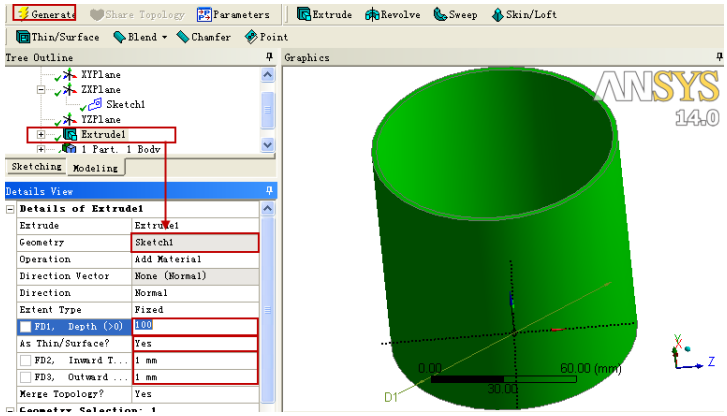


图 11-52　拉伸

Step8：选择 Sketch1（草绘）选项，再次单击工具栏中的Extrude拉伸按钮，如图 11-53 所示，在 Details View 面板中确保 Geometry 栏中 Sketch1 被选中，在 Depth 栏中输入拉伸长度为 2mm，然后单击工具栏中的Generate按钮，生成几何模型。

Step9：单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成。

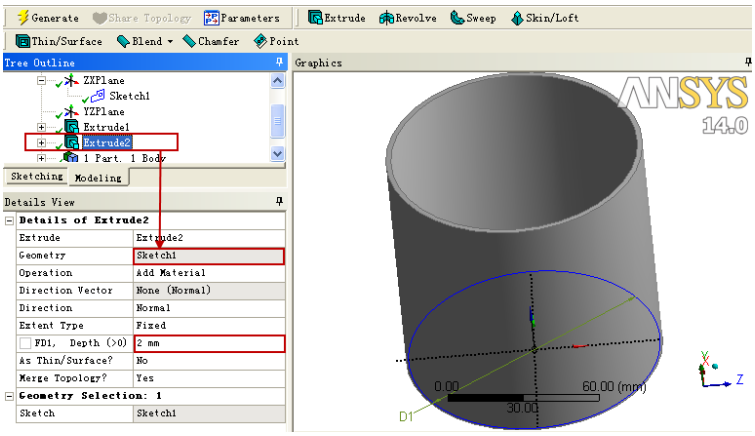


图 11-53　拉伸

4. 设置材料

本案例选用默认材料，即 Structural Steel。

5. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 A 中的 A4 栏 Model 选项，进入如图 11-54 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

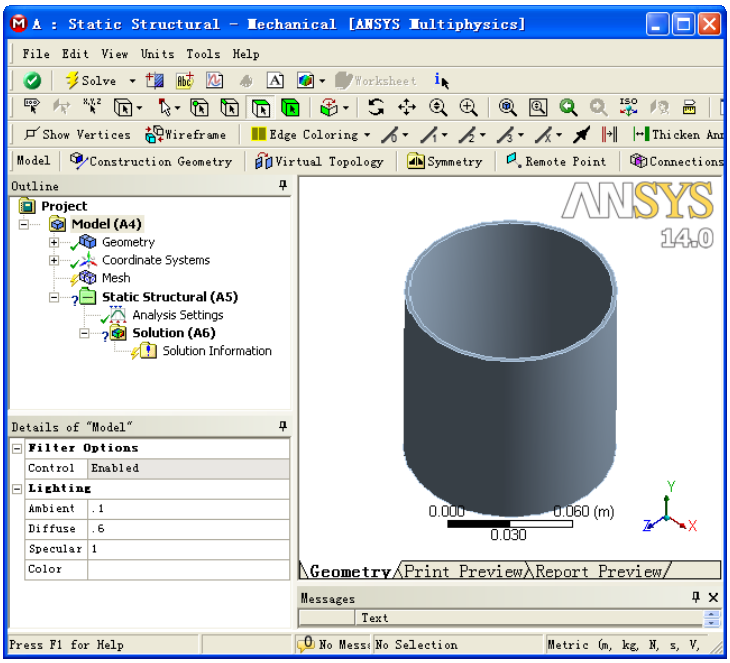


图 11-54　Mechanical 界面

Step2：如图 11-55 所示，此时 Structural Steel 材料已经被自动赋予模型。

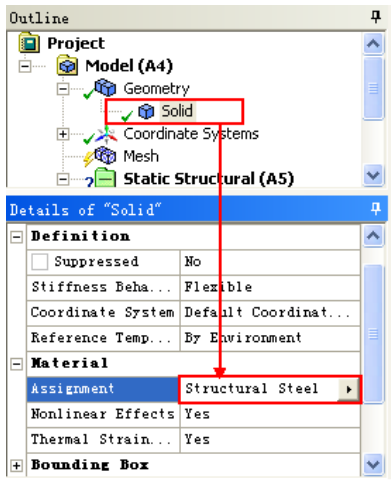


图 11-55　添加材料

6. 划分网格

Step1：如图 11-56 所示，选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，在 Details of "Mesh"面板中的 Element Size 栏中输入 2.e-003m，其余默认。

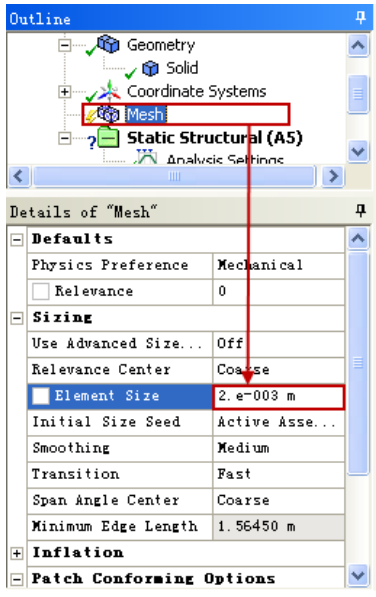


图 11-56　设置网格大小

Step2：如图 11-57 所示，右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step3：最终的网格效果如图 11-58 所示。

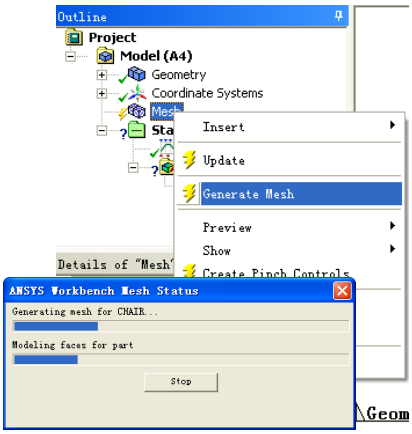


图 11-57　生成网格

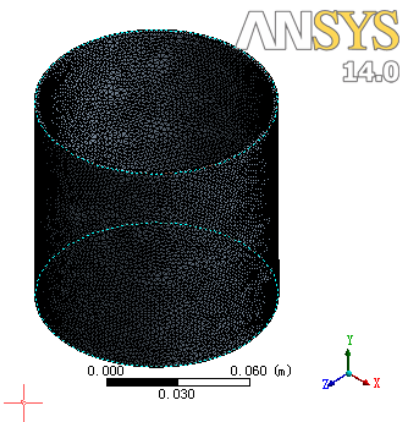


图 11-58　网格效果

7. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项，此时会出现如图 11-59 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Supports（约束）→Fixed Support（固定约束）命令，此时在分析树中会出现 Fixed Support 选项，如图 11-60 所示。

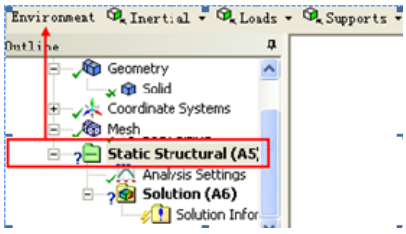


图 11-59　Environment 工具栏

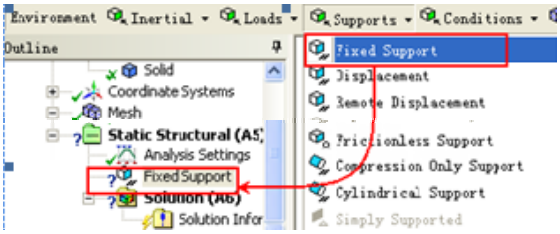


图 11-60　添加固定约束

Step3：选择 Fixed Support 选项，在工具栏中单击按钮选择如图 11-61 所示的钢管底面，单击 Details of "Gixed Support"（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，即可在选中面上施加固定约束。

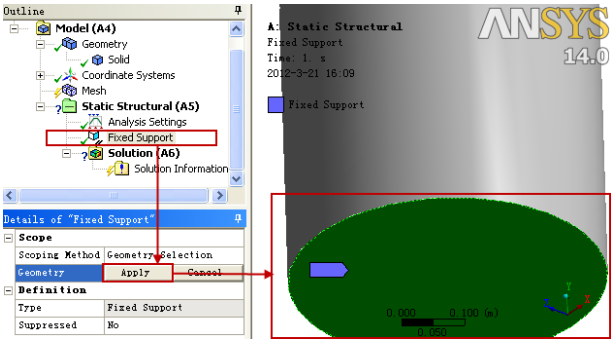


图 11-61　施加固定约束

Step4：如同 Step3 选择 Environment 工具栏中的 Loads（载荷）→Pressure（压力）命令，此时在分析树中会出现 Pressure 选项，如图 11-62 所示。

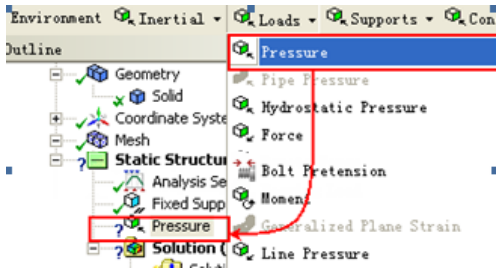


图 11-62　添加压力载荷

Step5：如同 Step3 选择 Pressure 选项，选择钢管上侧面，单击 Details of “Pressure”（参数列表）中 Geometry 选项下的 Apply 按钮，同时在 Define By 的 Magnitude 栏中输入 1.e+006Pa，如图 11-63 所示。

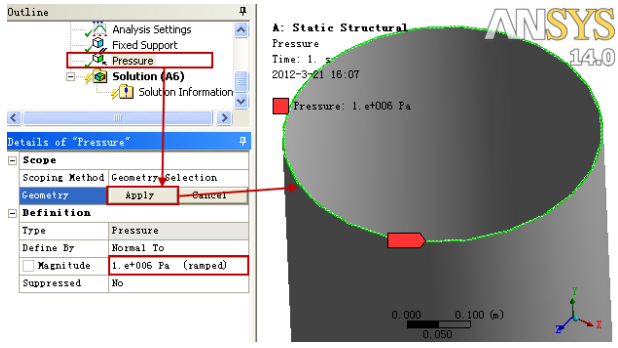


图 11-63　添加面载荷

Step6：在 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 11-64 所示。

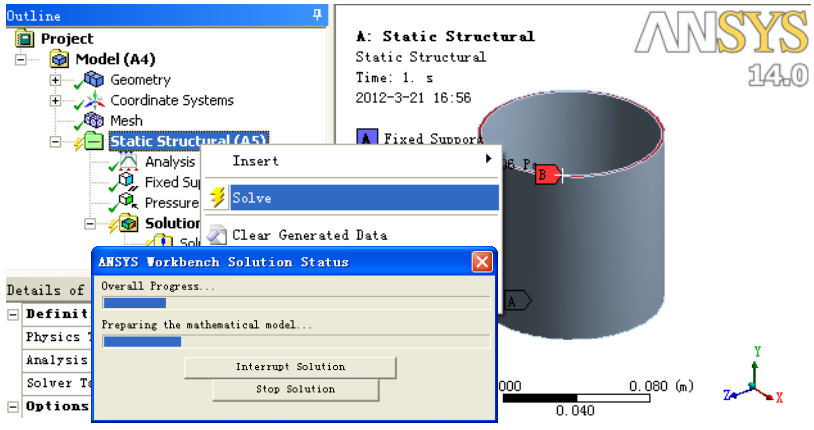


图 11-64　求解

8. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项，此时会出现如图 11-65 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 11-66 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

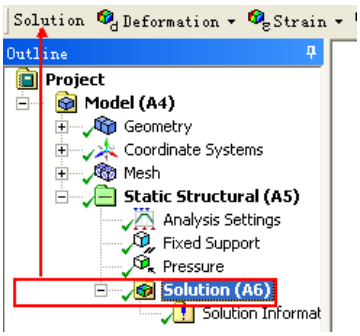


图 11-65　Solution 工具栏

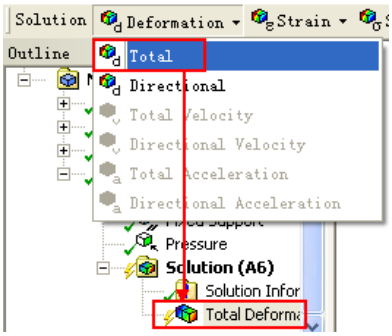


图 11-66　添加等效应力选项

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 11-67 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

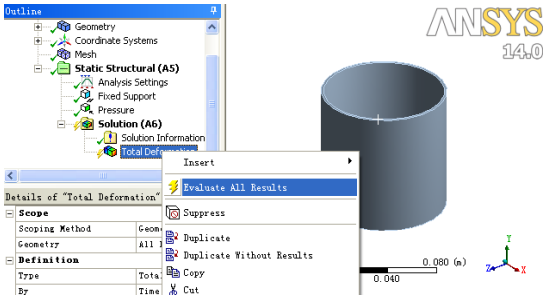


图 11-67　快捷菜单

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（A6）下的 Total Deformation（总变形）选项，此时会出现如图 11-68 所示的总变形分析云图。

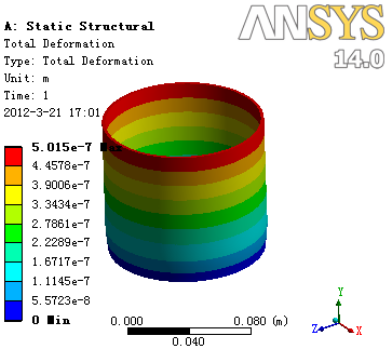


图 11-68　总变形云图

Step5：选择 Solution 工具栏中的 Stress→Equivalent（von-Mises）命令，如图 11-69 所示，此时在分析树中会出现 Equivalent Stress（等效应力）选项。

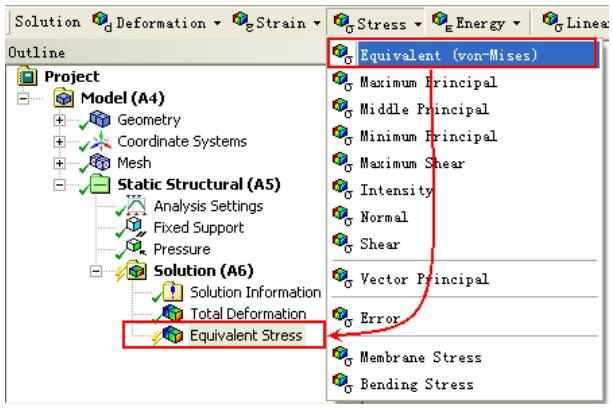


图 11-69　应力分析工具

Step6：同 Step3，在 Outline（分析树）中的 Solution（A6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，如图 11-70 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step7：如图 11-71 所示为应力分析云图。

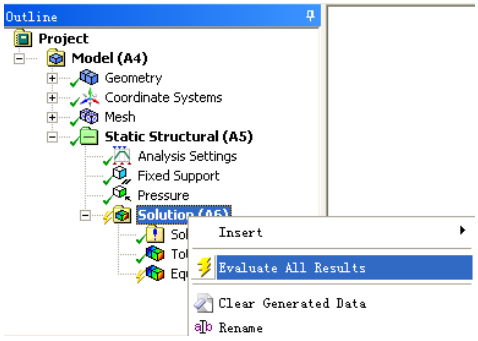


图 11-70　计算快捷菜单

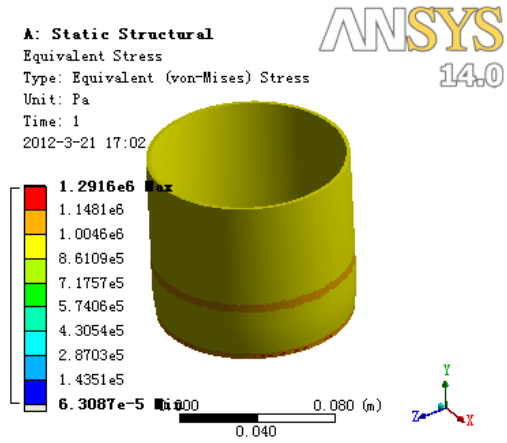


图 11-71　应力分布

9. 线性屈曲分析

Step1：如图 11-72 所示，将 Toolbox（工具箱）中的 Linear Buckling（线性屈曲分析）选项直接拖曳到项目 A（静力分析）的 A6Solution 中。

Step2：如图 11-73 所示，此时项目 A 的所有前处理数据已经全部导入项目 B 中，此时，如果双击项目 B 中的 B5Setup 选项即可直接进入 Mechanical 界面。

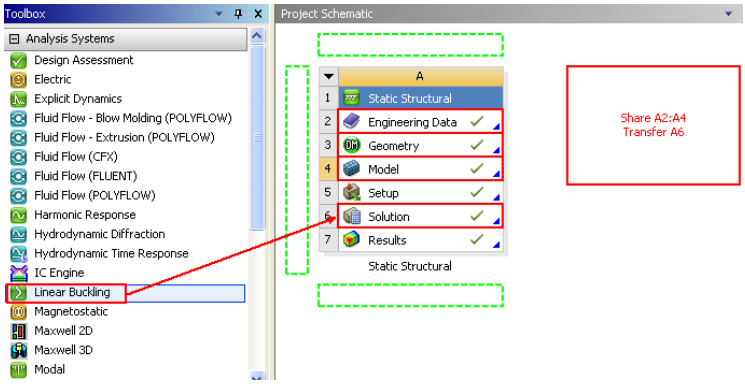


图 11-72　创建线性屈曲分析

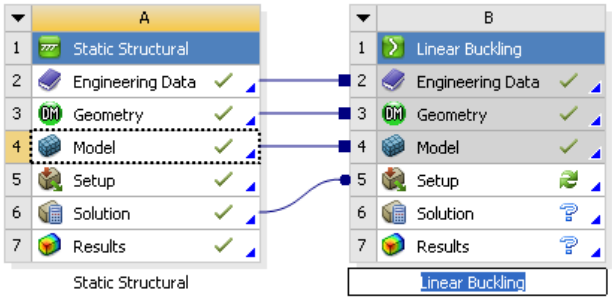


图 11-73　工程数据共享

10. 施加载荷与约束

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B5 栏 Setup 选项，进入如图 11-74 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

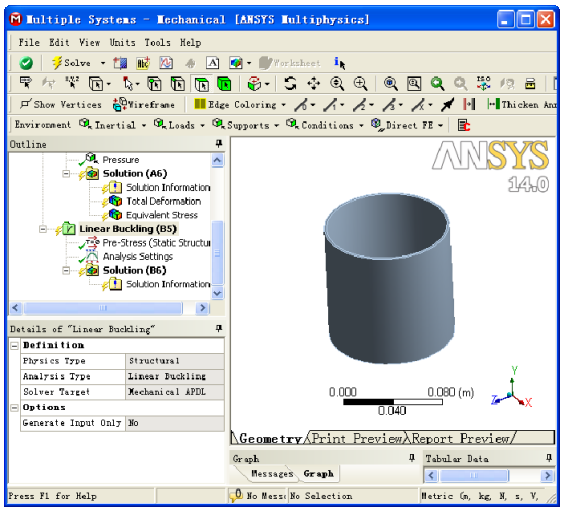


图 11-74　Mechanical 界面

Step2：如图 11-75 所示，在 Outline（分析树）中的 Static Structural（A5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step3：如图 11-76 所示，在 Outline（分析树）中的 Linear Buckling（B5）→Analysis Settings 选项单击，在下面出现的 Details of "Analysis Settings"选项的 Options 中做如下更改。

在 Max Modes to Find 栏中输入 10，表示 10 阶模态将被计算。

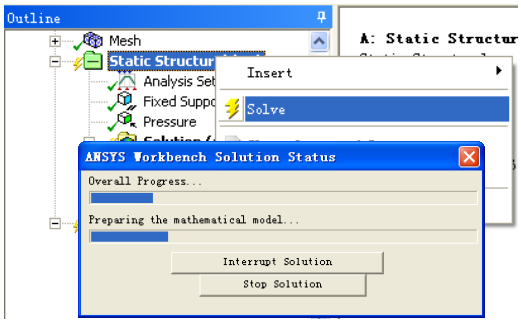


图 11-75　静力计算

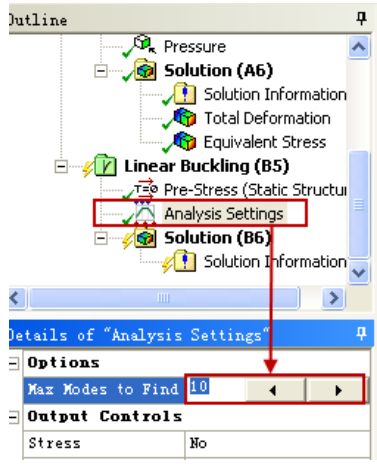


图 11-76　阶数设定

Step4：在 Outline（分析树）中的 Linear Buckling（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 11-77 所示。

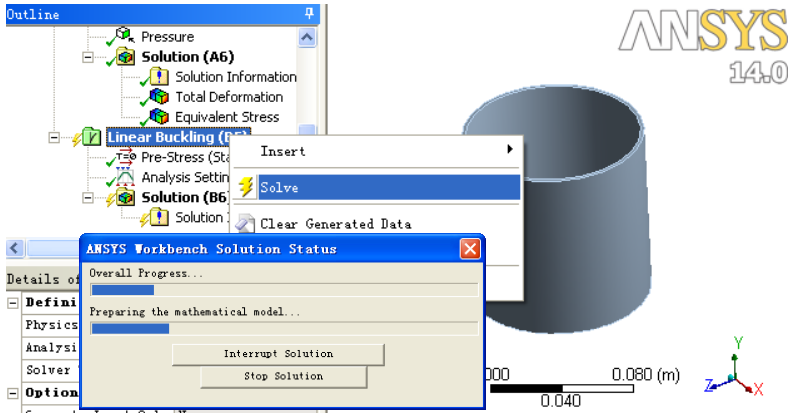


图 11-77　求解

11. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 11-78 所示的 Solution 工具栏。

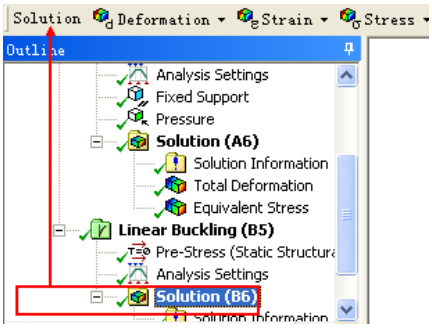


图 11-78　Solution 工具栏

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Deformation（变形）→Total 命令，如图 11-79 所示，此时在分析树中会出现 Total Deformation（总变形）选项。

Step3：选择 Solution 工具栏中的 Total Deformation（总变形）命令，在如图 11-80 所示的 Details of “Total Deformation”中的 Definition 中的 Mode 中输入 1。

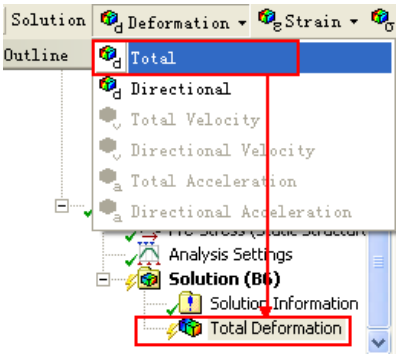


图 11-79　添加变形选项

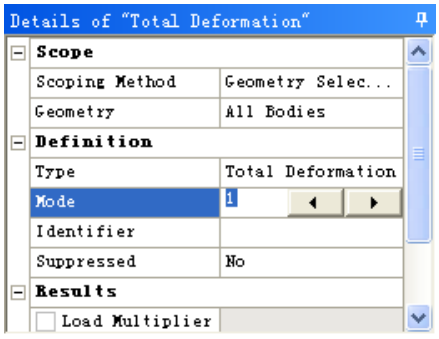


图 11-80　设置频率

Step4：如图 11-81 所示，右击 Solution 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 命令，进行后处理计算。

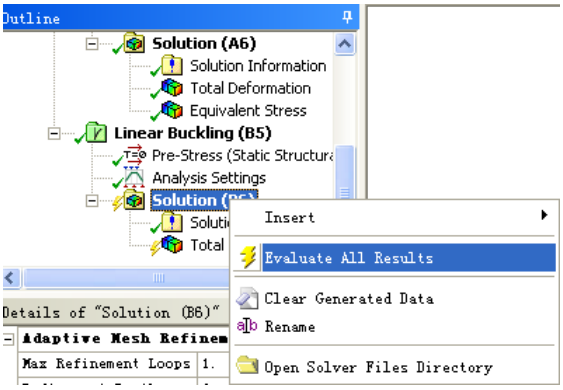


图 11-81　快捷菜单

Step5：图 11-82 所示为金属容器的第一阶模态变形云图。

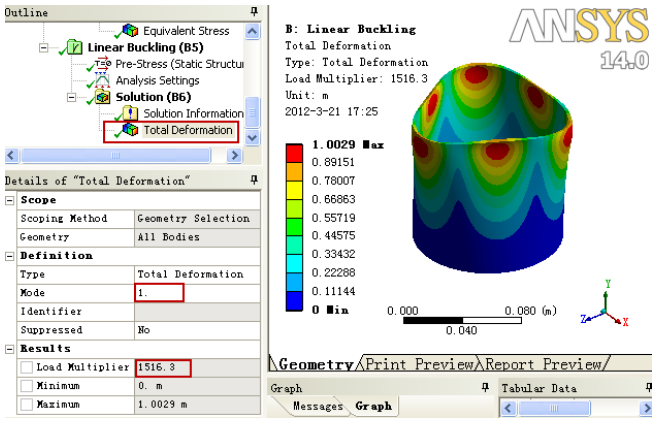


图 11-82　第一阶屈曲模态

从如图 11-82 所示的面板中可以查到第一阶屈曲载荷因子为 1516.3，由于施加载荷为 1MPa，故可知金属容器的屈曲压力为1516.3×1=1516.3MPa，变形形状为右侧云图所示。

第一阶临界载荷为 1516.3MPa，由于第一阶为屈曲载荷的最低值，因此这意味着在理论上，当压力达到 1516.3MPa 时金属容器将失稳。

12. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 11-83 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存文件名为 Shell_Bukling。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

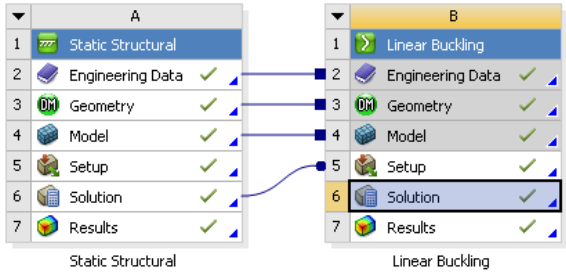


图 11-83　项目管理区中的分析项目

11.4 项目案例 3——工字梁屈曲分析

本节将通过一个工字梁屈曲分析例子来帮助读者学习屈曲分析的操作步骤。具体的问题描述及分析过程见下面的介绍。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 屈曲分析的方法及过程

模型文件	光盘\model\gongziliang.x_t
结果文件	光盘\example\gongziliang.x_t.wbpj

1. 问题描述

工字梁是工程中常用到的梁结构，而受压力的长梁的屈曲常是造成梁破坏的主要原因，因此需要对梁进行屈曲分析，该梁长 1m，端部受 1000N 的压力，如图 11-84 所示。该支承座材料为铝合金。

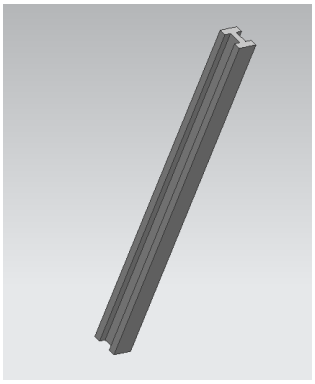


图 11-84　工字梁

2. 添加材料和导入模型

Step1：在主界面中建立分析项目，项目为静态结构分析（Static Structural）。双击分析系统中 Static Structural 选项，生成静态结构分析项目，如图 11-85 所示。

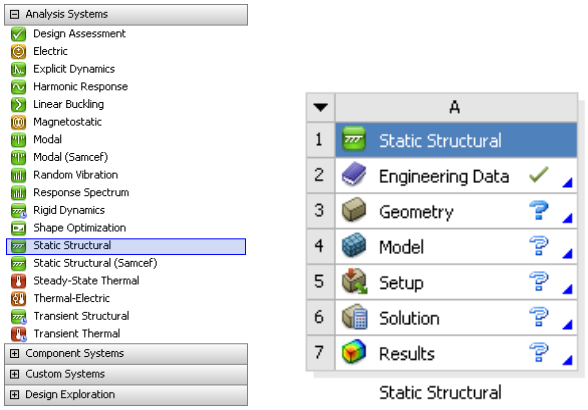


图 11-85　静态结构分析项目

Step2：双击 A 项目下部 Static Structural 选项，将分析项目名更改为工字梁静态，如图 11-86 所示。

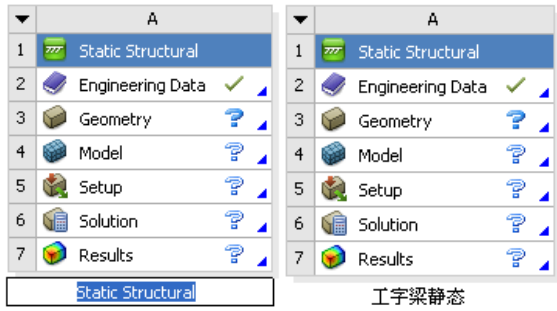


图 11-86　更改分析项目名称

Step3：双击 A2 栏 Engineering Data 选项，进入如图 11-87 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

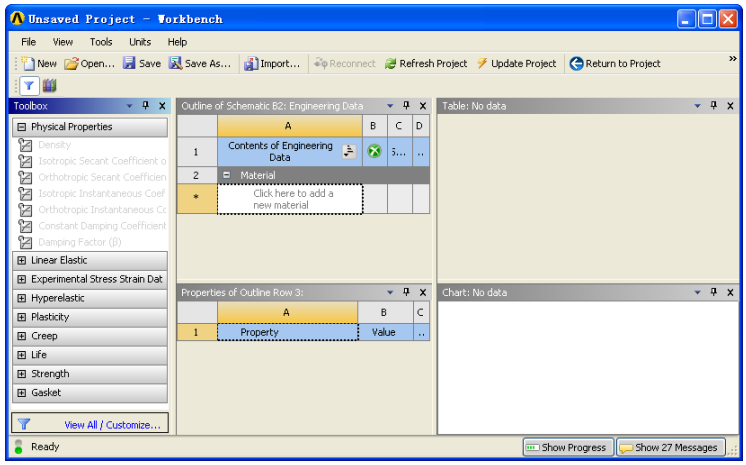


图 11-87　材料参数设置界面（一）

Step4：在界面的空白处右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 11-88 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic A2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

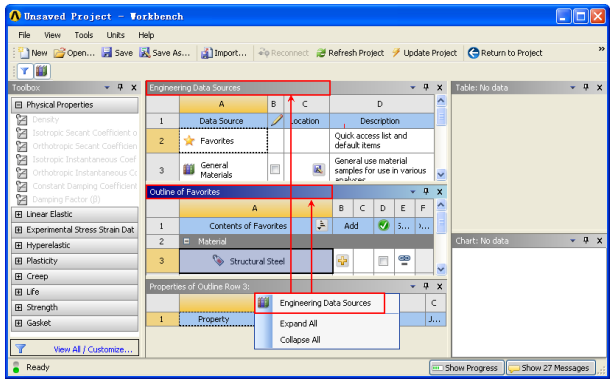


图 11-88　材料参数设置界面（二）

Step5：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A5 栏 Aluminum Alloy（铝合金）后的 B5 栏的（添加）按钮，此时在 C5 栏中会显示（使用中的）标识，如图 11-89 所示，标识材料添加成功。

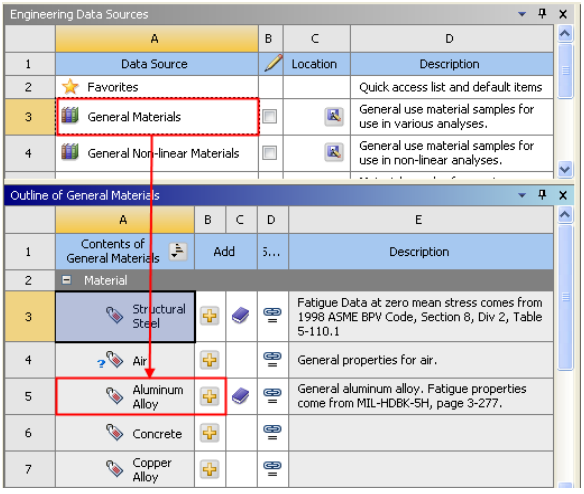


图 11-89　添加材料

Step6：同步骤 Step3，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step7：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Structal Steel 表中可以修改材料的特性，如图 11-90 所示，本实例采用的是默认值。

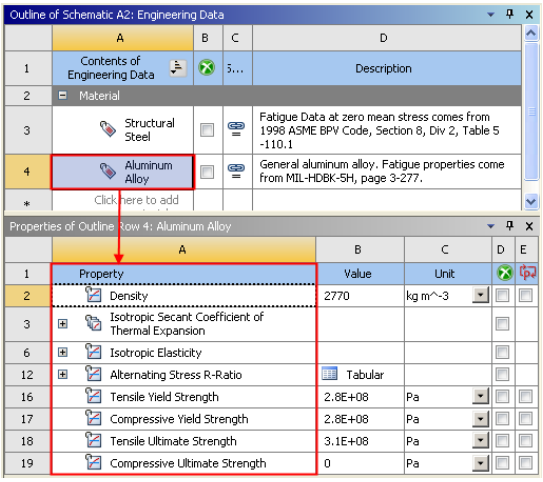


图 11-90　材料参数修改窗口

Step8：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回到 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

Step9：在 A3 栏的 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，在弹出的对话框中选择需要导入的模型 gongziliang.x_t，如图 11-91 所示。

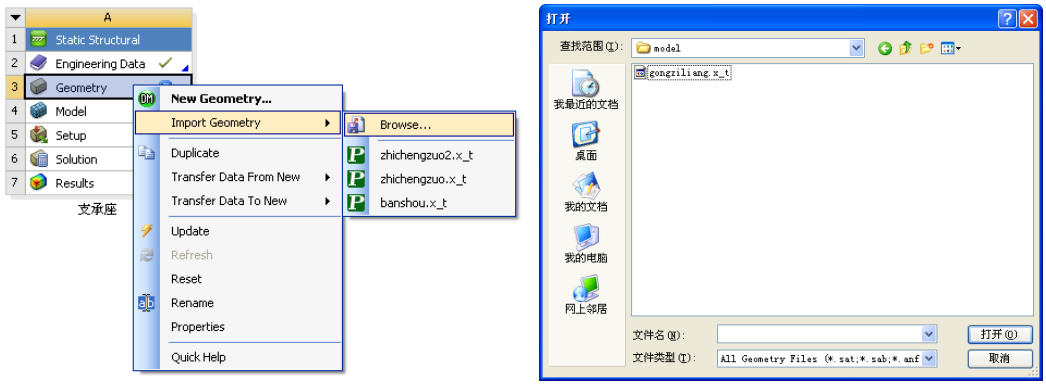


图 11-91　导入模型

3. 添加屈曲分析项目

由于屈曲分析都是耦合分析，其前期都要完成一个静态结构分析项目，再由该分析的结果传入线性屈曲分析项目中。

在 A6 栏 Solution 上右击，选择 Transfer Data To New→Linear Buckling 命令，如图 11-92 所示。便将静态结构分析的结果传入线性屈曲分析中，如图 11-93 所示。

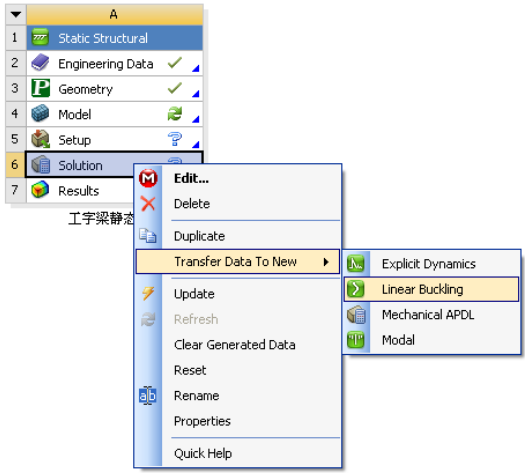


图 11-92　传导数据

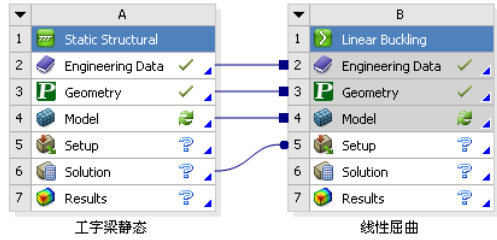


图 11-93　数据连接

4. 赋予材料和划分网格

Step1：双击分析项目中 A4 栏 Model 选项，打开 Mechanical 界面，此时可以看到界面中出现工字梁模型，如图 11-94 所示。

Step2：单击 Outline 栏的 Geometry 选项前部 ⊞ 按钮，选择 part1 选项，如图 11-95 所示。

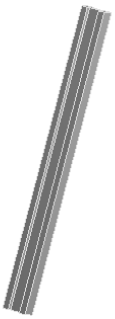


图 11-94　工字梁

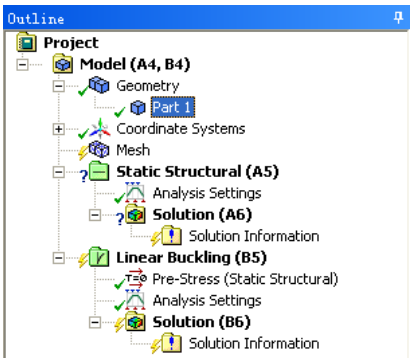


图 11-95　Outline 模型树

Step3：单击 Details of “Multiple Selection”栏中 Assignment 选项后按钮，如图 11-96 所示。选择 Structural Steel 选项。

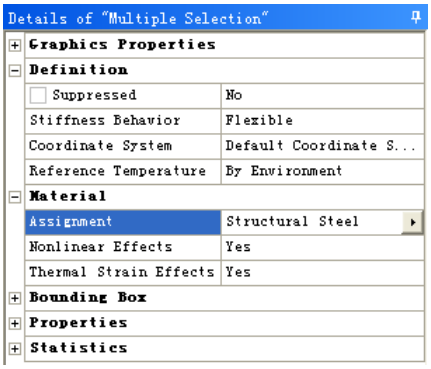


图 11-96　更改材料

Step4：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of “Mesh”（参数列表）中修改网格参数，本例中，将 Sizing 选型中的 Element Size 设为 15mm，其余采用默认设置。如图 11-97 所示。

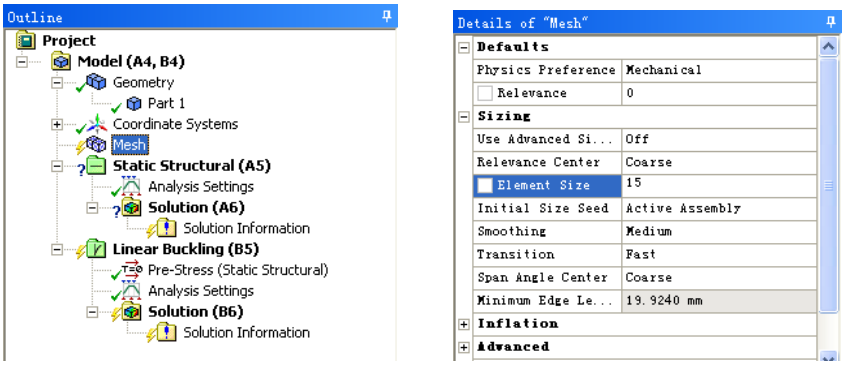


图 11-97　设置网格大小

Step5：在 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项上右击，选择 Generate Mesh 命令。如图 11-98 所示。生成后网格模型如图 11-99 所示。

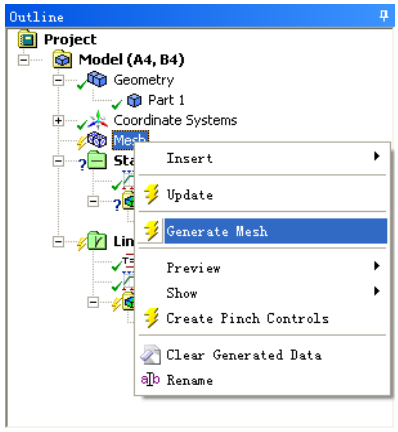


图 11-98　生成网格图

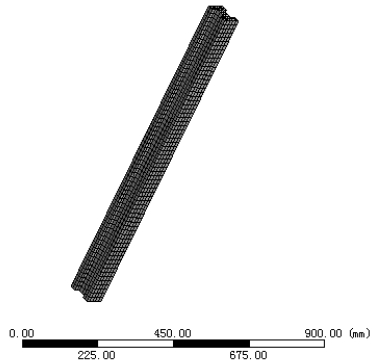


图 11-99　网格

5. 添加约束和载荷

Step1：选择 Outline 栏中 Static Structural（A5）选项，如图 11-100 所示，此时会出现如图 11-101 所示的 Environment（环境）工具栏。

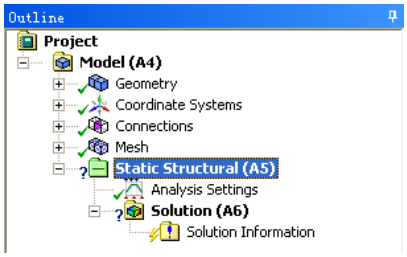


图 11-100　边界条件选项

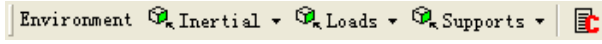


图 11-101　环境工具栏

Step2：选择 Environment（环境）工具栏中的 Supports 菜单，在下拉菜单中选择 Fixed Support 命令，如图 11-102 所示。

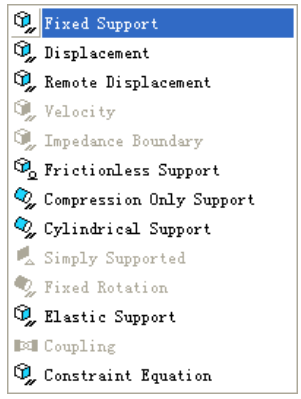


图 11-102　选择约束

Step3：选择工字梁底面，如图 11-103 所示。在 Details of “Fixed Support”栏中，单击 Geomtry 中的 Apply 按钮，如图 11-104 所示。

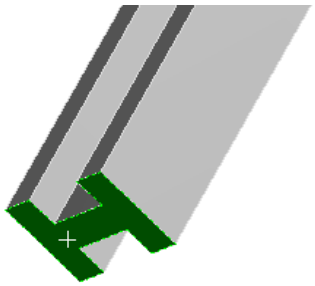


图 11-103　选择约束面

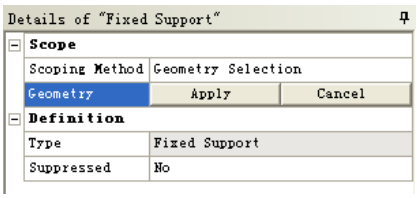


图 11-104　位移约束参数设置

Step4：选择 Environment（环境）工具栏中 Supports 菜单，选择 Force 命令，如图 11-105 所示。

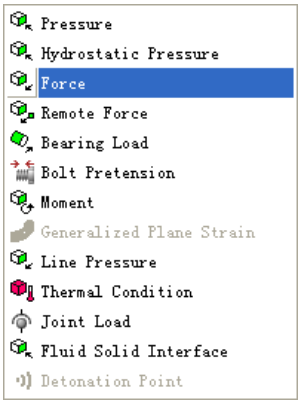


图 11-105　选择载荷

Step5：选择工字梁顶面，如图 11-106 所示。在 Details of “Force”栏中，单击 Geomtry 中的 Apply 按钮。并在 Magnitude 中输入 1，如图 11-107 所示。方向选择为向下，如图 11-108 所示。

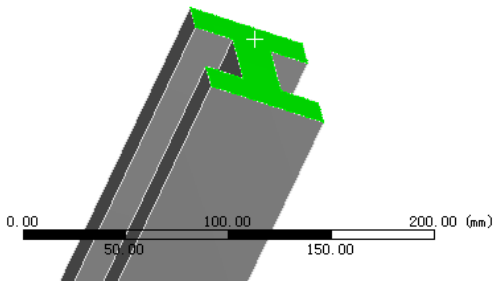


图 11-106　选择轴承载荷面

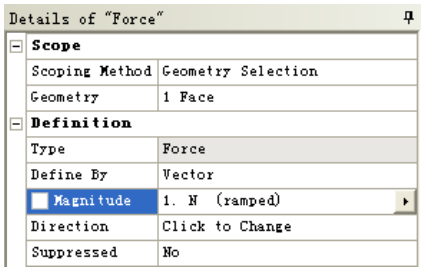


图 11-107　力载荷输入

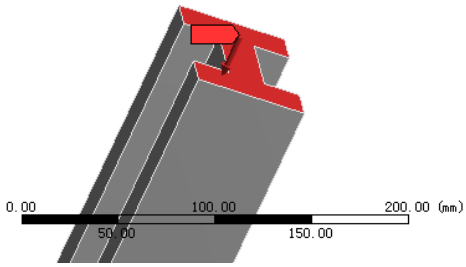


图 11-108　力加载方向

6. 静态力求解

在 Outline 栏中 Solution（A6）选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11-109 所示。求解时会出现进度栏。

当进度栏消失，同时 Solution（A6）选项前方出现 ✔ 标识，说明静态压力求解已经结束，但屈曲分析还未进行，如图 11-110 所示。

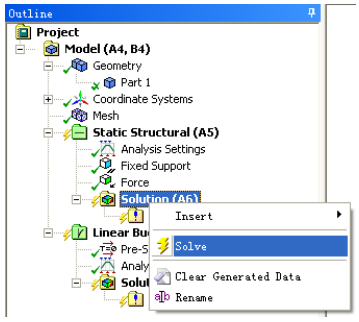


图 11-109　求解

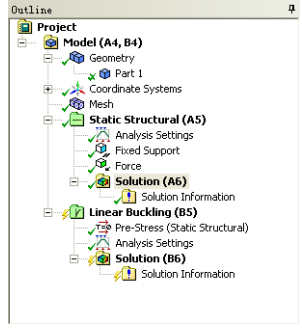


图 11-110　求解完成

7. 屈曲分析求解

Step1：在 Outline 栏中 Analysis Seting（B5）选项上单击，如图 11-111 所示。此时会出现 Details of “Analysis Settings”栏，如图 11-112 所示。

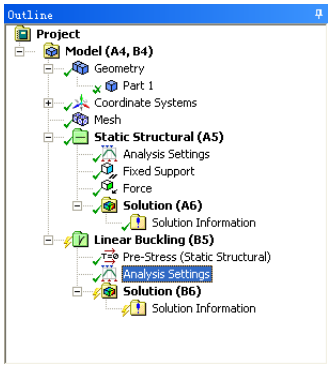


图 11-111　分析设置

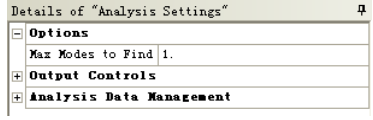


图 11-112　设置细节

Step2：在 Options 栏中可以输入最大模数，这里默认为 1。

Step3：在 Outline 栏中 Solution（B6）选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 11-113 所示。求解时会出现进度栏。当进度栏消失，同时 Solution（B6）选项前方出现✔标识，说明所有求解已经结束，如图 11-114 所示。

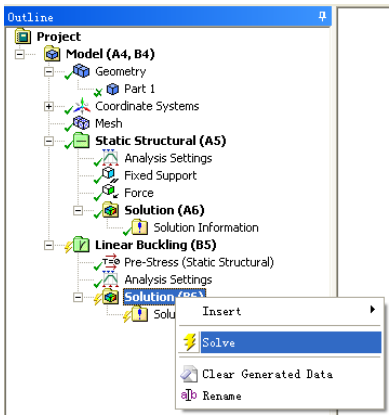


图 11-113　求解

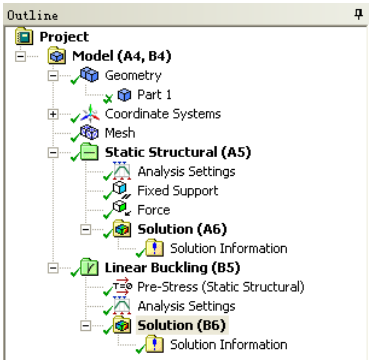


图 11-114　计算完成

8. 后处理

Step1：在 Outline 栏中的 Solution（B6）选项上右击，在出现的快捷菜单中依次选择 Insert →Deformation →Total 命令，添加变形分析结果，如图 11-115 所示。

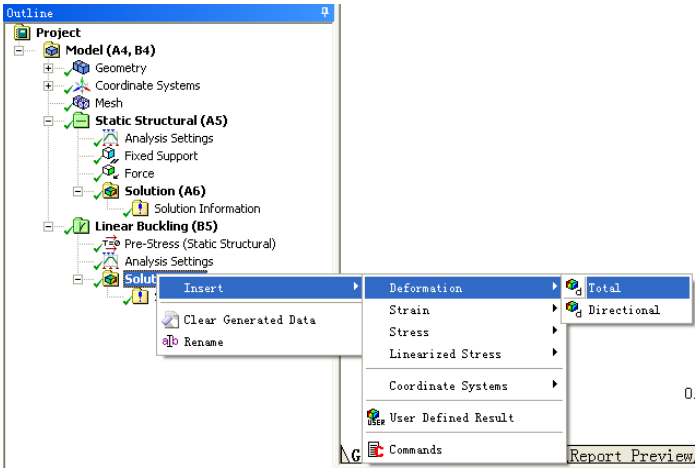


图 11-115　添加求解结果

Step2：在 Outline 栏中 Solution（A6）选项上右击，选择 Evaluate All Results 显示结果，如图 11-116 所示。

Step3：在 Outline 栏中 Solution（A6）中 Total Deformation 选项上单击，显示变形结果，如图 11-117 所示。

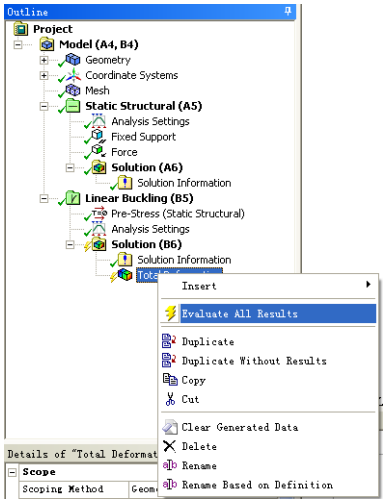


图 11-116　提取求解结果

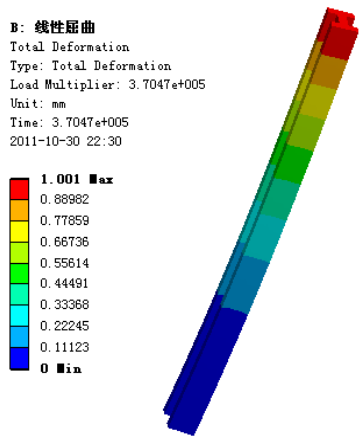


图 11-117 变形结果

Step4：在界面右下部有 Tabular Data 显示，其中 Load Multiplier 数值为 3.7047e+005。如图 11-118 所示。因为之前加载的力为 1N，乘上屈曲参数，那么能够得出的屈曲力就是 3.7047e+005N。

Tabular Data

	Mode	Load Multiplier
1	1.	3.7047e+005

图 11-118　屈曲参数

9. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的按钮，退出 Mechanical 返回 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 11-119 所示。

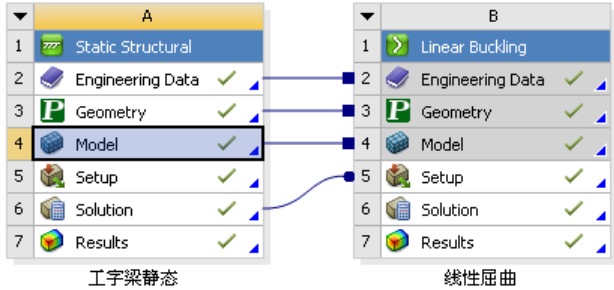


图 11-119　项目分析完成

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save 按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击主界面右上角的按钮，退出 Workbench，完成项目分析。

11.5 本章小结

本章节详细地介绍了 ANSYS Workbench 14.0 软件线性屈曲分析功能，包括几何导入、网格划分、边界条件设定、后处理等操作，同时还简单介绍了临界屈曲载荷的求解方法与载荷因子的计算方法。

通过本章节的学习，读者应该对线性屈曲分析的过程有详细的了解。

第 12 章

热力学分析及实例详解

热学是物理场中常见的一种现象，在工程分析中，热学包括热传导、热对流和热辐射三种基本形式，计算热力学在工程应用中至关重要，如在高温作用下的压力容器，如果温度过高会导致内部气体膨胀，使压力容器爆裂刹车片刹车制动时瞬时间产生大量热，容易使刹车片产生热应力等。本章主要介绍 ANSYS Workbench 热学分析，讲解稳态和瞬态热学计算过程。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 温度场分析的方法及过程。

（2）熟练掌握 ANSYS Workbench 稳态温度场分析的设置与后处理。

（3）熟练掌握 ANSYS Workbench 瞬态温度场分析的时间设置方法。

（4）掌握零件热点处的瞬态温升曲线的处理方法。

12.1 热力学分析简介

在石油化工、动力、核能等许多重要部门中，在变温条件下工作的结构和部件，通常都存在温度应力问题。

在正常工况下存在稳态的温度应力，在启动或关闭过程中还会产生随时间变化的瞬态温度应力。这些应力已经占有相当的比重，甚至成为设计和运行中的控制应力。要计算稳态或者瞬态应力，首先要计算稳态或者瞬态温度场。

1. 热力学分析

热力学分析的目的就是计算模型内的温度分布及热梯度、热流密度等物理量。热载荷包括热源、热对流、热辐射、热流量、外部温度场等。

2. 瞬态分析

ANSYS Workbench 可以进行两种热分析，即稳态热分析和瞬态热分析。

1）稳态热力学分析一般方程为

$$[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{I}\}=\{\boldsymbol{Q}\} \tag{12-1}$$

式中，$[\boldsymbol{K}]$ 是传导矩阵，包括热系数、对流系数及辐射系数和形状系数；$\{\boldsymbol{I}\}$ 是节点温度向量；$\{\boldsymbol{Q}\}$ 是节点热流向量，包含热生成。

2）瞬态热力学分析一般方程为

$$[\boldsymbol{C}]\{\boldsymbol{T}\}+[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{T}\}=\{\boldsymbol{Q}\} \tag{12-2}$$

式中，$[\boldsymbol{K}]$ 是传导矩阵，包括热系数、对流系数及辐射系数和形状系数；$[\boldsymbol{C}]$ 是比热矩阵，考虑系统内能的增加；$\{\boldsymbol{T}\}$ 是节点温度向量；$\{\boldsymbol{T}\}$ 是节点温度对时间的导数；$\{\boldsymbol{Q}\}$ 是节点热流向量，包含热生成。

3. 基本传热方式

基本传热方式有热传导、热对流及热辐射。

1）热传导

当物体内部存在温差时，热量从高温部分传递到低温部分；不同温度的物体相接触时，热量从高温物体传递到低温物体。这种热量传递的方式称为热传导。

热传导遵循傅立叶定律为

$$q''=-k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \tag{12-3}$$

式中，q'' 是热流密度，其单位为 $\mathrm{W/m^2}$；k 是导热系数，其单位为 W/(m℃)。

2）热对流

对流是指温度不同的各个部分流体之间发生相对运动所引起的热量传递方式。高温物体表面附近的空气因受热而膨胀，密度降低而向上流动，密度较大的冷空气将下降替代原来的受热空气而引发对流现象。热对流分为自然对流和强迫对流两种。

热对流满足牛顿冷却方程为

$$q''=h(T_s-T_b) \tag{12-4}$$

式中，h 是对流换热系数（或称膜系数）；T_s 是固体表面温度；T_b 是周围流体温度。

3）热辐射

热辐射是指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。与热传导和热对流不同，热辐射不需要任何传热介质。

实际上，真空的热辐射效率最高。同一物体，温度不同时的热辐射能力不一样，温度相同的不同物体的热辐射能力也不一定一样。同一温度下，黑体的热辐射能力最强。

在工程中通常考虑两个或者多个物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可用斯蒂芬波尔兹曼方程来计算，即

$$q=\varepsilon\sigma A_1F_{12}(T_1^4-T_2^4) \tag{12-5}$$

式中，q 为热流率；ε 为辐射率（黑度）；σ 为黑体辐射常熟 $\sigma\approx5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2\cdot K^4)}$；$A_1$ 为辐射面 1 的面积；F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数；T_1 为辐射面 1 的绝对温度；T_2 为辐射面 2 的绝对温度。

从热辐射的方程可以得知，如果分析包含热辐射，则分析为高度非线性。

12.2 项目案例 1——稳态热分析实例

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的稳态热分析模块，计算实体梁模型在 100N 瞬态力作用下的位移响应。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 建模方法及瞬态动力学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\beizi.x_t
结果文件	光盘\example\beizi_Thermal.wbpj

1. 问题描述

如图 12-1 所示为某实体梁模型，请用 ANSYS Workbench 分析计算实体梁模型在-*Y* 方向作用 100N 的瞬态力下的位移响应情况。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 12-2 所示。

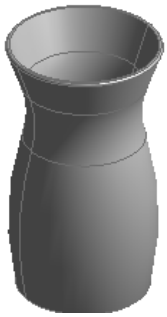


图 12-1　杯子模型

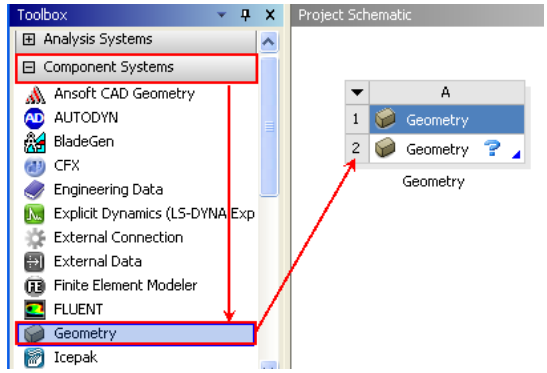


图 12-2　创建分析项目 A

3. 导入几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 12-3 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的“打开”对话框中选择文件路径，导入 beizi.x_t 几何体文件，如图 12-4 所示，此时 A2Geometry 后的 ? 变为 ✓，表示实体模型已经存在。

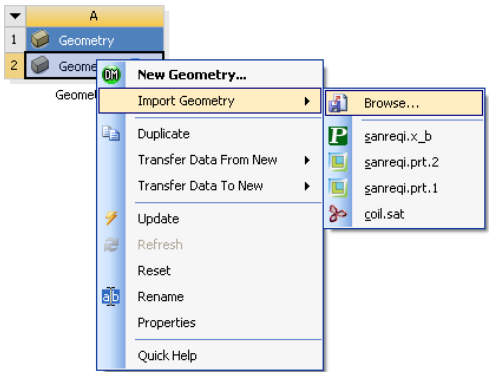


图 12-3　导入几何体

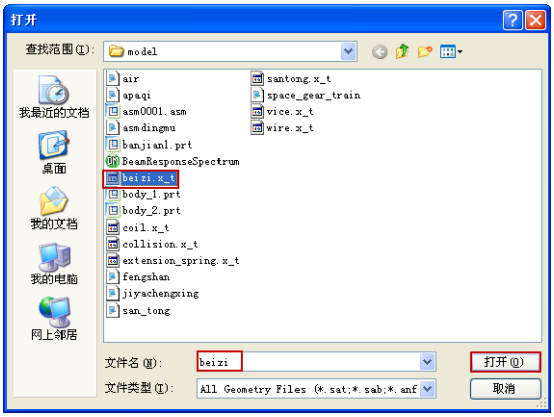


图 12-4　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 Geometry 选项，此时会进入 DesignModeler 界面，在弹出的“单位设置”对话框选择 Millimeter 选项，单击 OK 按钮。此时设计树中 Import1 前显示⚡，表示需要生成，图形窗口中没有图形显示，如图 12-5 所示。

Step4：单击 Generate（生成）按钮，即可显示生成的几何体，如图 12-6 所示，此时可在几何体上进行其他的操作，本例无需进行操作。

Step5：单击工具栏中的图标，在弹出的“另存为”对话框的名称栏中输入 beizi_thermal，并单击“保存”按钮。

Step6：回到 DesignModeler 界面中，单击右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler，返回 Workbench 主界面。

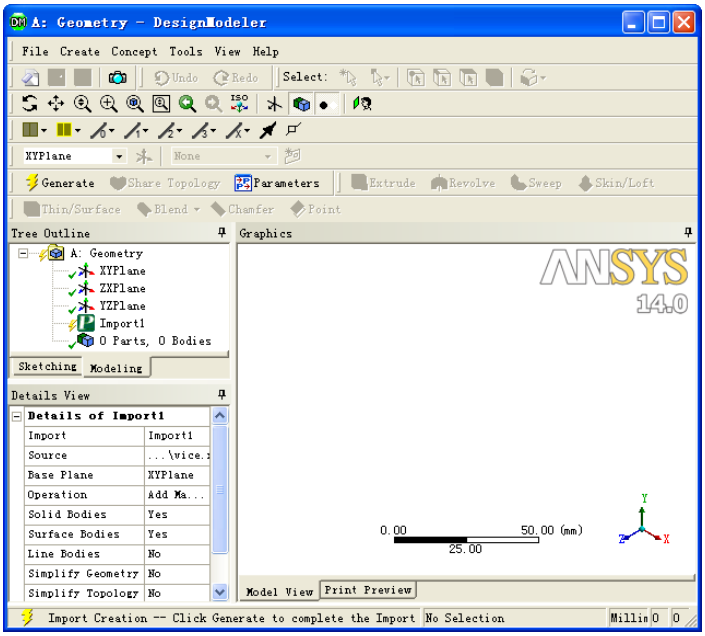


图 12-5　生成前的 DesignModeler 界面

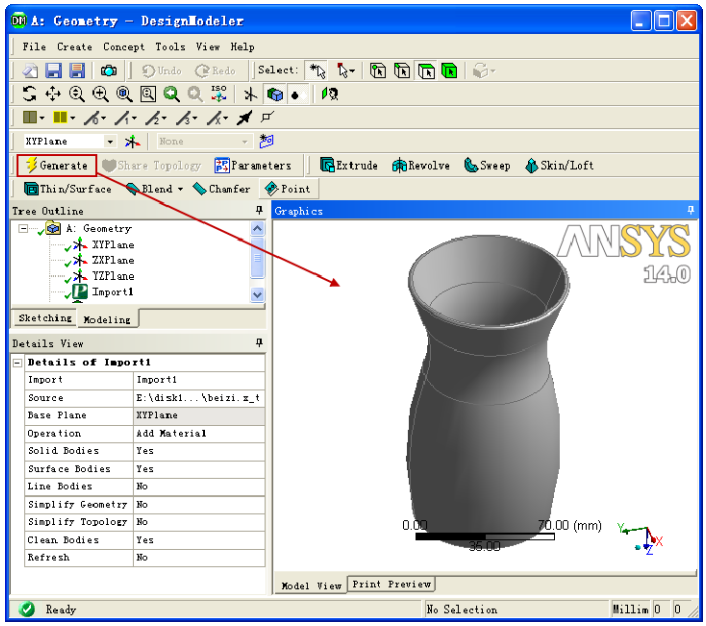


图 12-6　生成后的 DesignModeler 界面

4. 创建分析项目

Step1：如图 12-7 所示，在 Workbench 主界面的 Toolbox（工具箱）→Analysis Systerms 中选择 Steady-State Thermal（稳态热分析）选项，并直接拖曳到项目 A 的 A2（Geometry）栏中。

Step2：此时会出现如图 12-8 所示的项目 B，同时在项目 A 的 A2（Geometry）与项目 B 的 B3（Geometry）之间出现一条连接线，此时说明数据在项目 A 与项目 B 之间实现共享。

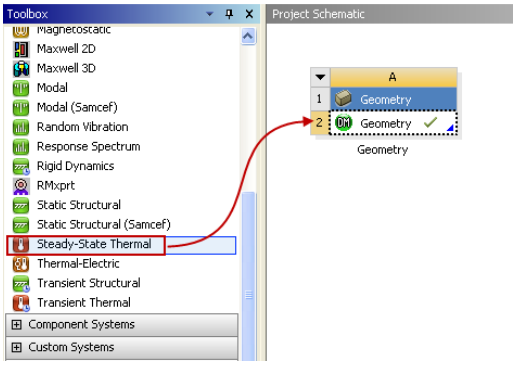


图 12-7　创建项目

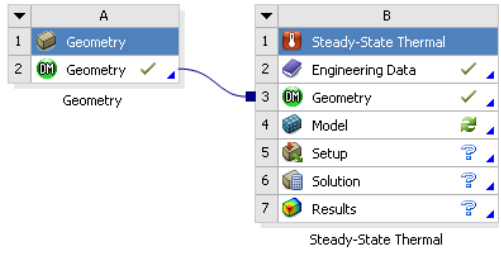


图 12-8　项目数据共享

5. 添加材料库

Step1：双击项目 B 中的 B2Engineering Data 选项，进入如图 12-9 所示的材料参数设置界面，在该界面下即可进行材料参数设置。

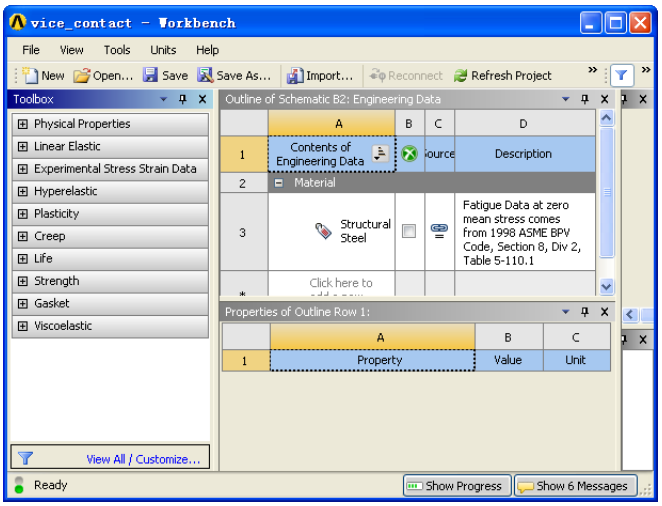


图 12-9　材料参数设置界面（一）

Step2：在界面的 A1 表中右击，弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，此时的界面会变为如图 12-10 所示的界面。原界面窗口中的 Outline of Schematic B2: Engineering Data 消失，被 Engineering Data Sources 及 Outline of General Materials 取代。

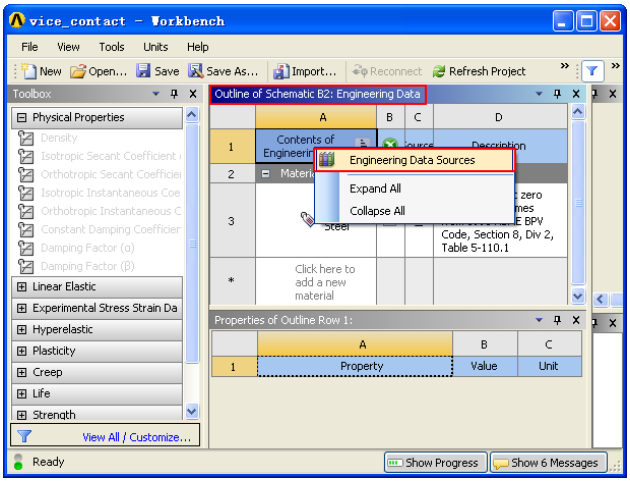


图 12-10　材料参数设置界面（二）

Step3：在 Engineering Data Sources 表中选择 A3 栏 General Materials 选项，然后单击 Outline of General Materials 表中 A5 栏 Aluminium Alloy（铝合金）后的 B5 栏的（添加）按钮，此时在 C5 栏中会显示（使用中的）标识，如图 12-11 所示，标识材料添加成功。

Step4：同步骤 Step2，在界面的空白处右击，在弹出快捷菜单中选择 Engineering Data Sources（工程数据源）命令，返回到初始界面中。

Step5：根据实际工程材料的特性，在 Properties of Outline Row 3: Stainless Steel 表中可以修改材料的特性，如图 12-12 所示，本实例采用的是默认值。

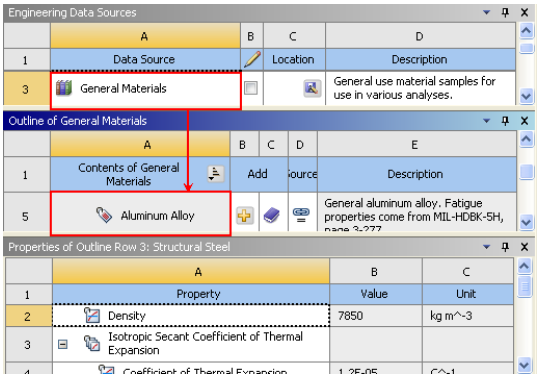


图 12-11　添加材料

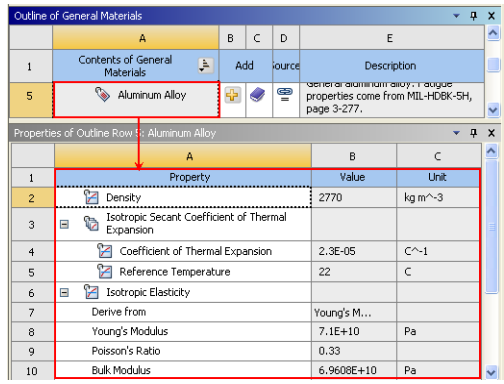


图 12-12　材料参数修改窗口

Step6：单击工具栏中的 Return to Project 按钮，返回 Workbench 主界面，材料库添加完毕。

6. 添加模型材料属性

Step1：双击主界面项目管理区项目 B 中的 B4 栏 Model 选项，进入如图 12-13 所示 Mechanical 界面，在该界面下即可进行网格的划分、分析设置、结果观察等操作。

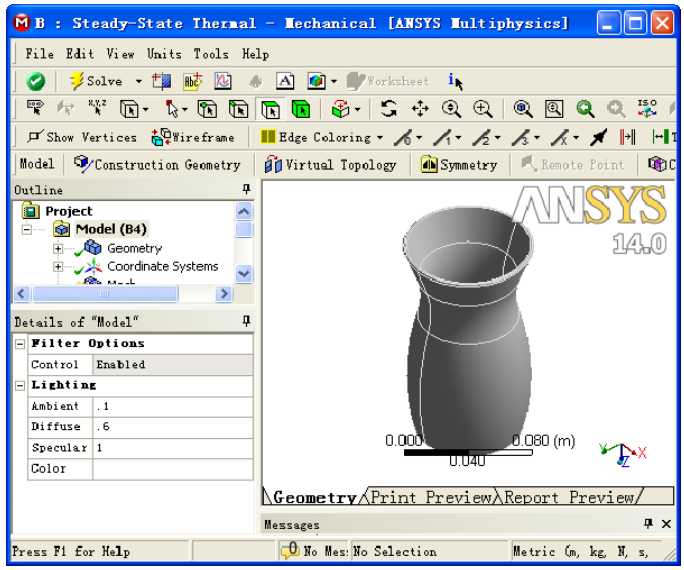


图 12-13　Mechanical 界面

Step2：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中 Geometry 选项下的 BEIZI-W，此时即可在 Details of “BEIZI-W”（参数列表）中给模型添加材料，如图 12-14 所示。

Step3：单击参数列表中的 Material 下 Assignment 后的按钮，此时会出现刚刚设置的材料 Aluminium Alloy，选择即可将其添加到模型中去。其余模型采用默认的即可。

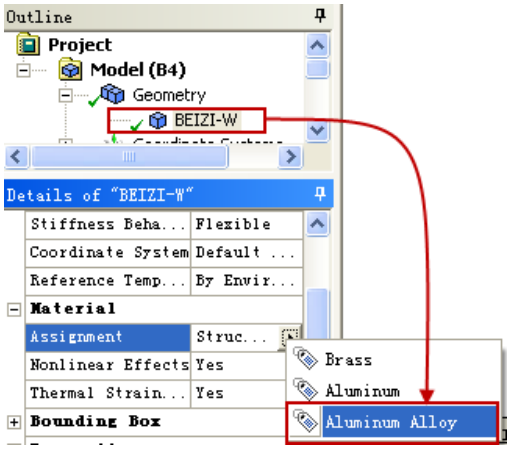


图 12-14　修改材料属相

7. 划分网格

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时可在 Details of "Mesh"（参数列表）中修改网格参数，如图 12-15 所示，在 Sizing 中的 Relevance Center 中设置为 Fine，在 Element Size 中输入 0.002m，其余采用默认设置。

Step2：在 Outlines（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 12-15 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 12-16 所示。

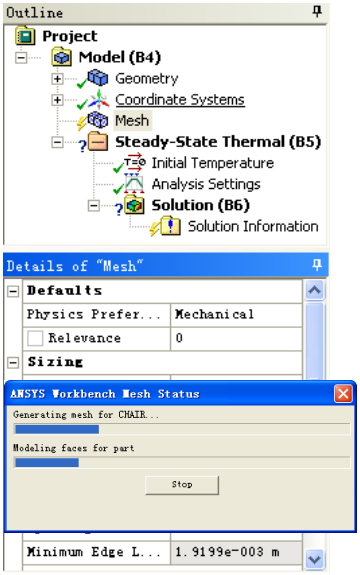


图 12-15　生成网格

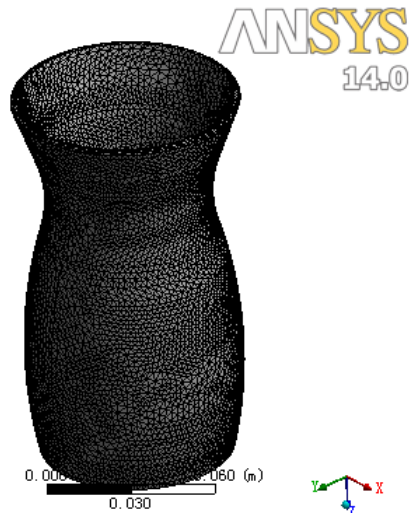


图 12-16　网格效果

8. 施加载荷与约束

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal （B5）

选项，此时会出现如图 12-17 所示的 Environment 工具栏。

Step2：选择 Environment 工具栏中的 Temperature（温度）命令，此时在分析树中会出现 Temperature 选项，如图 12-18 所示。

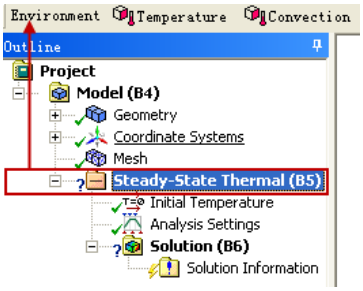


图 12-17　Environment 工具栏

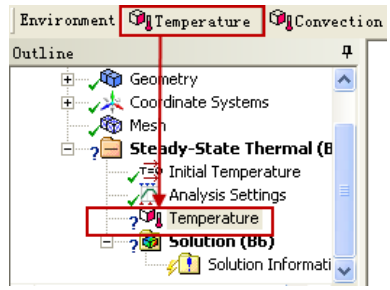


图 12-18　添加载荷

Step3：如图 12-19 所示，选择 Temperature 选项，选择杯子底面，确保 Details of “Temperature”中 Geometry 栏中出现 2Faces，表明杯子底面被选中，在 Definition→Magnitude 中输入 80℃，完成一个热载荷的添加。

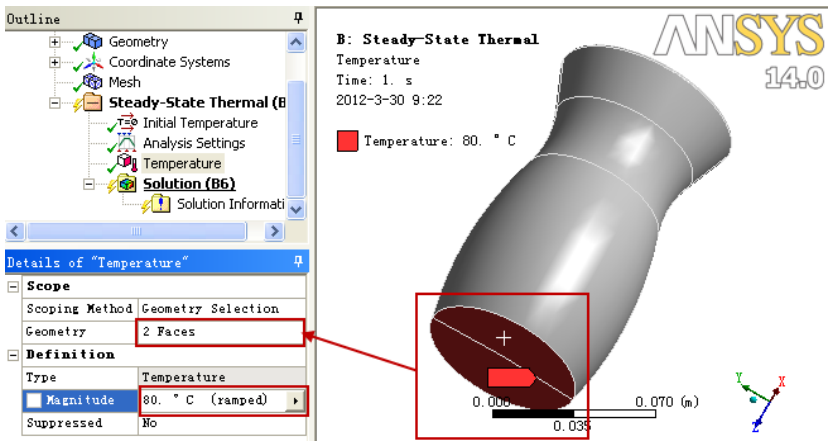


图 12-19　施加载荷

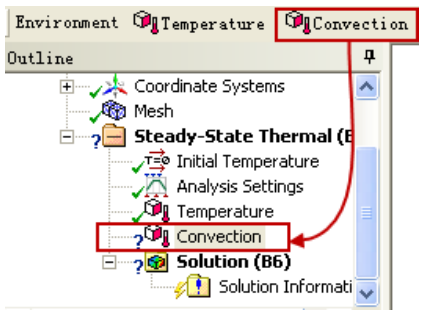


图 12-20　添加对流

Step4：选择 Environment 工具栏中的 Convection（对流）命令，此时在分析树中会出现 Convection 选项，如图 12-20 所示。

Step5：如图 12-21 所示，选择 Convection 选项，选择杯子底面，确保 Details of “Convection”中 Geometry 栏中出现 6Faces，表明杯子外表面的六个面被选中，在 Definition→File Coefficient 栏中单击 ▸ 按钮，此时会弹出如图 12-22 所示的“设置”对话框，在对话框中选择 Stagnant Air-Simplified Case 选项，单击 OK 按钮，完成一个对流的添加。

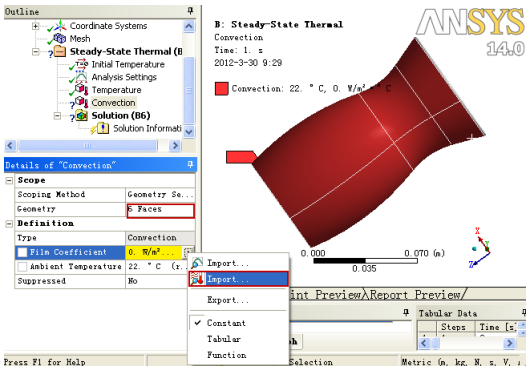


图 12-21　对流面

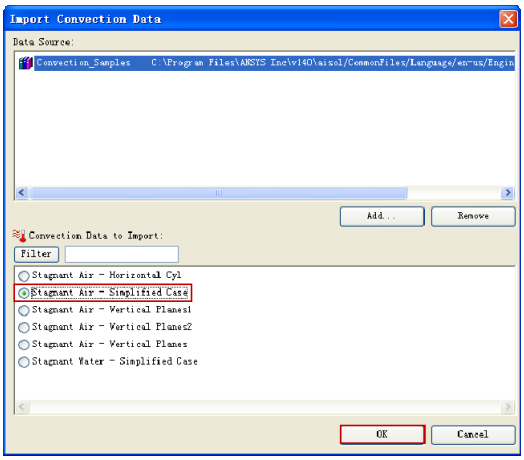


图 12-22　对流方式

Step6：在 Outline（分析树）中的 Steady-State Thermal（B5）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失，如图 12-23 所示。

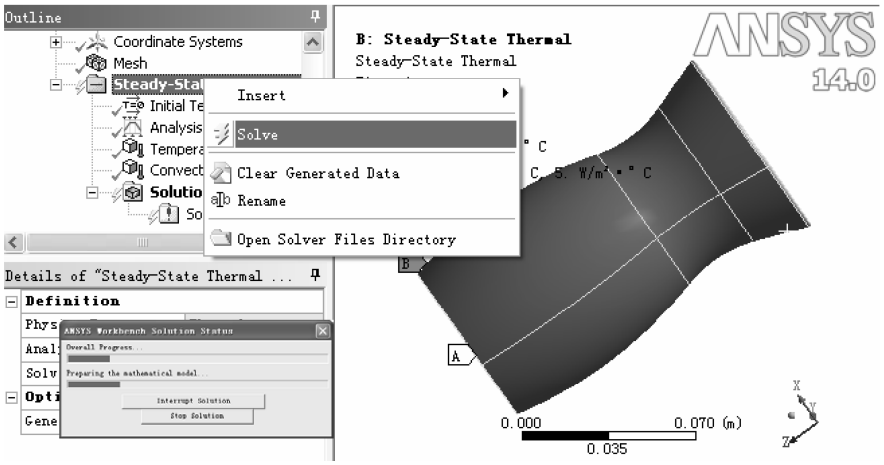


图 12-23　求解

9. 结果后处理

Step1：选择 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项，此时会出现如图 12-24 所示的 Solution 工具栏。

Step2：选择 Solution 工具栏中的 Thermal（热）→Temperature 命令，如图 12-25 所示，此时在分析树中会出现 Temperature（温度）选项。

Step3：在 Outline（分析树）中的 Solution（B6）选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 12-26 所示，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

Step4：选择 Outline（分析树）中 Solution（B6）下的 Temperature（温度）选项，如图 12-27 所示。

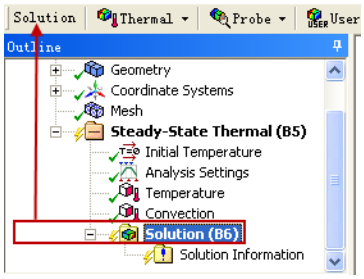


图 12-24　Solution 工具栏

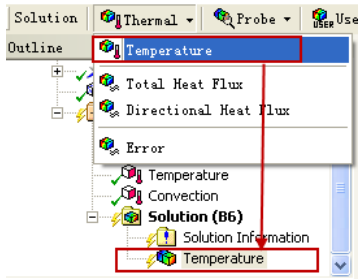


图 12-25　添加温度选项

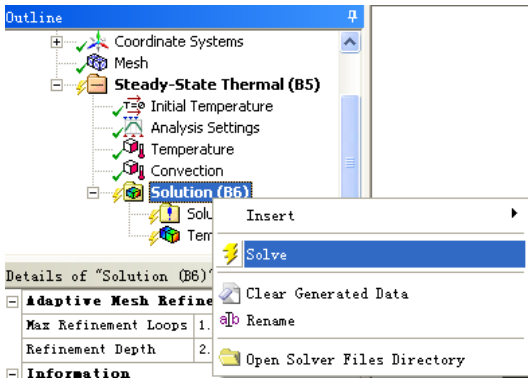


图 12-26　快捷菜单

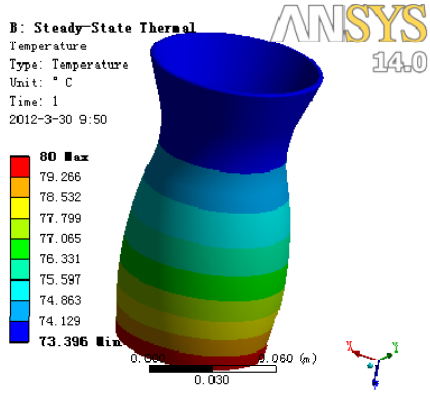


图 12-27　温度分布

Step5：同样的操作方法，查看热流量，如图 12-28 所示。

10. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时，主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 12-29 所示。

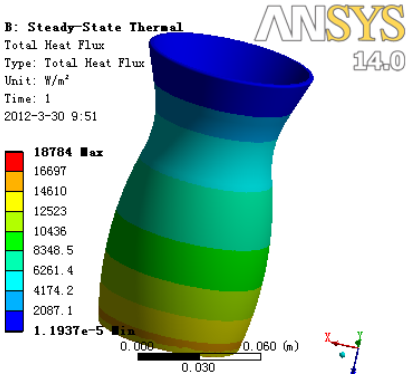


图 12-28　热流量云图

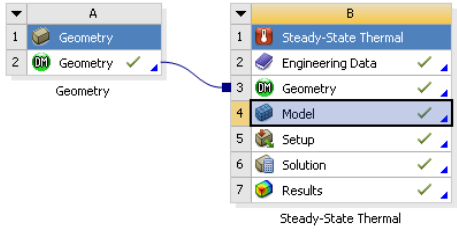


图 12-29　项目管理区中的分析项目

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮，保存包含有分析结果的文件。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

12.3 项目案例 2——杯子瞬态热学分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的瞬态热学分析模块，计算杯子温度分布。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 瞬态热学分析的方法及过程。

模型文件	光盘\model\beizi.x_t
结果文件	光盘\example\beizi_Transient_Thermal.wbpj

1. 瞬态热学分析

选择主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Transient Thermal（瞬态热分析）命令，如图 12-30 所示，然后将鼠标移动到项目 B 的 B6（Solution）中，此时在项目 B 的右侧出现一个项目 C，项目 B 与项目 C 的数据实现共享。

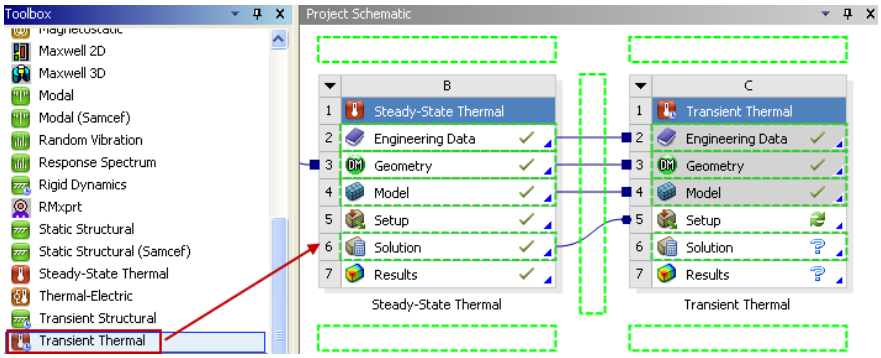


图 12-30　创建顺态热分析

2. 设置分析选项

Step1：双击 C5 栏，进入 Mechanical 平台。

Step2：选择 Analysis Settings 选项，在出现的 Details of “Analysis Settings”面板中的 Step End Time 输入 5s，如图 12-31 所示。

Step3：添加温度载荷，如图 12-32 所示，在 Details of “Temperature”面板中做如下设置。

① 选择杯子底面，确保在 Geometry 栏中出现 2Faces，表明杯子底面被选中。

② 在 Magnitude 栏中输入 0 时刻温度为 22℃；5 时刻的温度为 80℃。

Step4：如图 12-33 所示，在 Transient Thermal（C5）选项上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，此时会弹出进度显示条，表示正在求解，当求解完成后进度条自动消失。

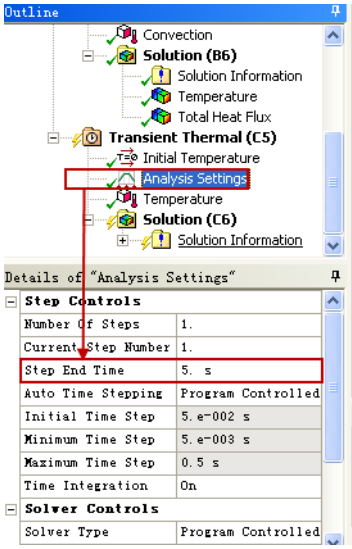


图 12-31　分析设置

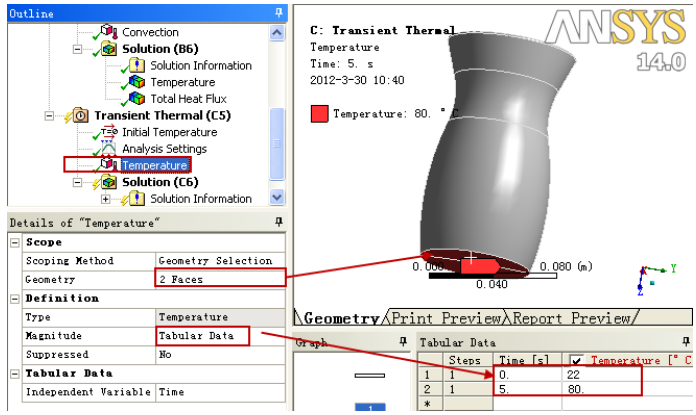


图 12-32　添加激励

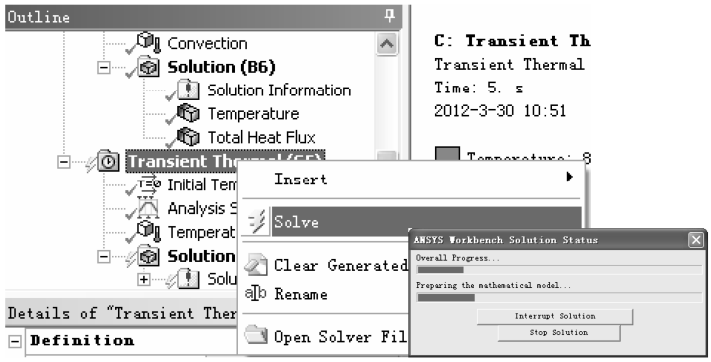


图 12-33　计算求解

3. 后处理

同稳态热分析一样，可以查看温度分布，如图 12-34 所示。

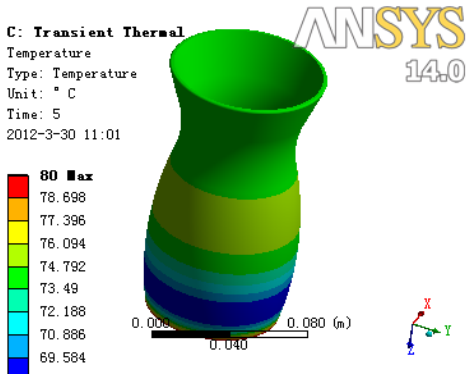


图 12-34　温度分布

4. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回到 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 12-35 所示。

Step2：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

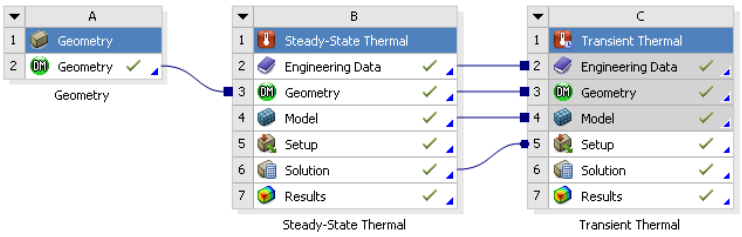


图 12-35　项目管理区中的分析项目

12.4 本章小结

本章节介绍了一个杯子受热的稳态热学分析与瞬态热学分析，在分析过程中考虑了与周围空气的对流换热边界，在后处理工程中得到了温度分布云图及热流密度分布云图。

通过本章节的学习，读者应该对热学分析的过程有详细的了解。

第 13 章

疲劳分析及实例详解

结构失效的一个常见原因是疲劳，其造成破坏与重复加载有关，如长期转动的齿轮、叶轮等，都会存在不同程度的疲劳破坏，轻则是零件损坏，重则会出现人身生命危险。为了在设计阶段研究零件的预期疲劳程度，通过有限元的方式对零件进行疲劳分析。本章主要介绍 ANSYS Workbench 疲劳分析，讲解疲劳分析的计算过程。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS Workbench 疲劳分析的方法及过程。

（2）熟练掌握 ANSYS Workbench 疲劳分析的应用场合。

（3）熟练掌握 ANSYS Workbench 疲劳常见分析方法的分类。

13.1 疲劳分析简介

疲劳失效是一种常见的失效形式，本章通过一个简单的实例讲解了疲劳分析的详细过程和方法。

1. 疲劳概述

结构失效的一个常见原因是疲劳，其造成破坏与重复加载有关。

因此，应力通常比材料的极限强度低，应力疲劳（Stress-based）用于高周疲劳；低周疲劳是在循环次数相对较低时发生的。

塑性变形常伴随低周疲劳，其阐明了短疲劳寿命。一般认为应变疲劳（strain-based）应该用于低周疲劳计算。

在设计仿真中，疲劳模块拓展程序（Fatigue Module add-on）采用的是基于应力疲劳（stress-based）理论，它适用于高周疲劳。接下来，将对基于应力疲劳理论的处理方法进行讨论。

2. 恒定振幅载荷

在前面曾提到，疲劳是由于重复加载引起。当最大和最小的应力水平恒定时，称为恒定振幅载荷，下面将针对这种最简单的形式，首先进行讨论。否则，则称为变化振幅或非恒定振幅载荷。

3. 成比例载荷

载荷可以是比例载荷，也可以是非比例载荷。比例载荷，是指主应力的比例是恒定的，并且主应力的削减不随时间变化，实质意味着由于载荷的增加或反作用造成的响应很容易得到计算。

相反，非比例载荷没有隐含各应力之间的相互关系，典型情况包括以下几种。

- $\sigma 1/\ \sigma 2$=constant。
- 在两个不同载荷工况间的交替变化。
- 交变载荷叠加在静载荷上。
- 非线性边界条件。

4. 应力定义

考虑在最大最小应力值σ_{max}和σ_{min}作用下的比例载荷、恒定振幅的情况有以下几种。

- 应力范围$\Delta\sigma$定义为（$\sigma_{max}-\sigma_{min}$）。
- 平均应力σ_m定义为（$\sigma_{max}+\sigma_{min}$）/2。
- 应力幅或交变应力σ_a是$\Delta\sigma/2$。
- 应力比 R 是$\sigma_{min}/\sigma_{max}$。

当施加的是大小相等且方向相反的载荷时，发生的是对称循环载荷。这就是σ_m=0，R=−1 的情况。

当施加载荷后又撤除该载荷，将发生脉动循环载荷。这就是$\sigma_m=\sigma_{max}/2$，R=0 的情况。

5. 应力−寿命曲线

载荷与疲劳失效的关系，采用的是应力-寿命曲线或 S-N 曲线来表示。

（1）若某一部件在承受循环载荷，经过一定的循环次数后，该部件裂纹或破坏将会发展，而且有可能导致失效。

（2）如果同个部件作用在更高的载荷下，导致失效的载荷循环次数将减少。

（3）应力−寿命曲线或 S-N 曲线，展示出应力幅与失效循环次数的关系。

S-N 曲线是通过对试件做疲劳测试得到的弯曲或轴向测试，反映的是单轴的应力状态。影响 S-N 曲线的因素很多，其中一些需要注意的方面如下：

材料的延展性，材料的加工工艺，几何形状信息，包括表面光滑度、残余应力及存在的应力集中，载荷环境，包括平均应力、温度和化学环境。

例如，压缩平均应力比零平均应力的疲劳寿命长，相反，拉伸平均应力比零平均应力的疲劳寿命短，对压缩和拉伸平均应力，平均应力将分别提高和降低 S-N 曲线。

一个部件通常经受多轴应力状态。如果疲劳数据（S-N 曲线）是从反映单轴应力状态的测试中得到的，那么在计算寿命时就要注意以下几个方面。

（1）设计仿真为用户提供了如何把结果和 S-N 曲线相关联的选择，包括多轴应力的选择。

（2）双轴应力结果有助于计算在给定位置的情况。

平均应力影响疲劳寿命，并且变换在 S-N 曲线的上方位置与下方位置（反映出在给

定应力幅下的寿命长短）。

（1）对于不同的平均应力或应力比值，设计仿真允许输入多重 S-N 曲线（实验数据）。

（2）如果没有太多的多重 S-N 曲线（实验数据），那么设计仿真也允许采用多种不同的平均应力修正理论。

早先曾提到影响疲劳寿命的其他因素，也可以在设计仿真中可以用一个修正因子来解释。

6. 总结

疲劳模块允许用户采用基于应力理论的处理方法，来解决高周疲劳问题。以下情况可以用疲劳模块来处理。

- 恒定振幅，比例载荷。
- 变化振幅，比例载荷。
- 恒定振幅，非比例载荷。
- 需要输入的数据是材料的 S-N 曲线。

其中，S-N 曲线是疲劳实验中获得，而且可能本质上是单轴的，但在实际的分析中，部件可能处于多轴应力状态。S-N 曲线的绘制取决于许多因素，包括平均应力，在不同平均应力值作用下的 S-N 曲线的应力值可以直接输入，或可以执行通过平均应力修正理论实现。

13.2 项目案例——椅子疲劳分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的静态力学分析模块的疲劳分析功能，计算座椅在外荷载下的寿命周期与安全系数等。

学习目标：熟练掌握 ANSYS Workbench 静态力学分析模块的疲劳分析功能的方法及过程。

模型文件	无
结果文件	光盘\example\Chair_Fatigue.wbpj

1. 问题描述

如图 13-1 所示为某旋转座椅模型，请用 ANSYS Workbench 分析如果座椅上收到 94040Pa 的压力，座椅的疲劳分布及安全性能。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：在工具栏中单击 Open... 图标，打开已有工程文件，在弹出的如图 13-2 所示的“打开”对话框中选择 StaticStructure 文件名，并单击“打开”按钮。



图 13-1　座椅模型

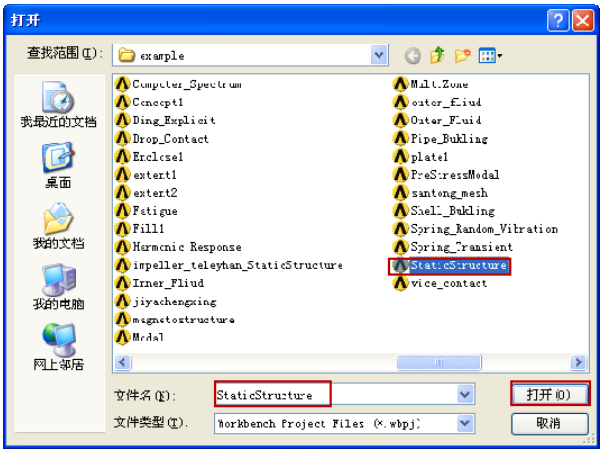


图 13-2　打开文件

3. 保存工程文件

Step1：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save As... （另存为）按钮，如图 13-3 所示，保存文件名为 Chair_Fatigue。

Step2：　双击项目 A 中的 A7（Result）栏，此时会进入 Mechanical 平台。

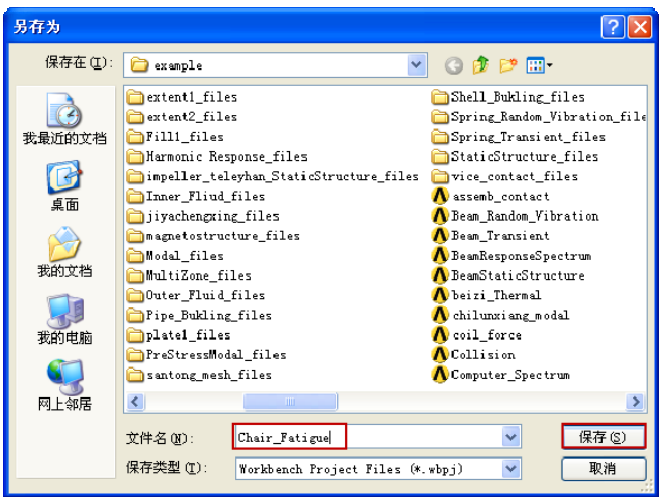


图 13-3　总变形分析云图

4. 更改设置

Step1：在 Mechanical 平台中，选择 Model（A4）→Geometry→CHAIR 命令，如图 13-4 所示，然后在下面出现的 Details of “CHAIR”面板中将材料属性更改为 Structural Steel。

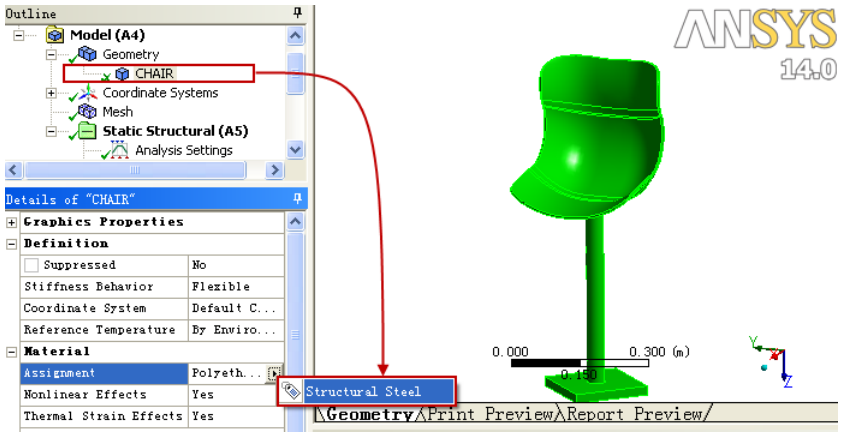


图 13-4　更改材料属性

Step2：选择 Static Structural（A5）→Pressure 命令，如图 13-5 所示，在下面出现的 Details of "Pressure"面板中将载荷设置为 94040Pa。

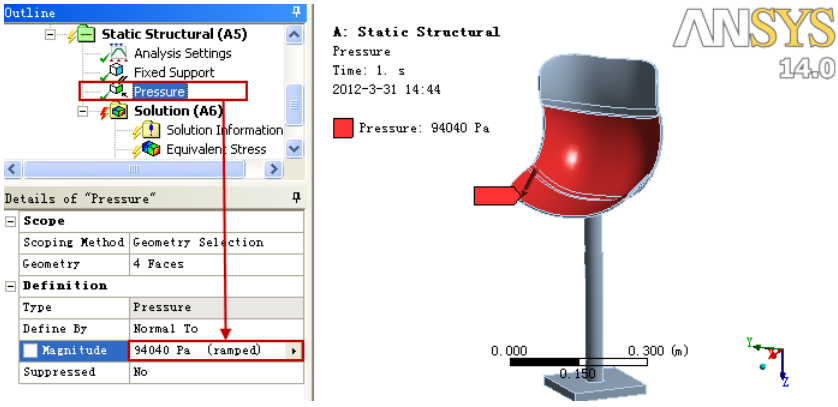


图 13-5　设置压力值

Step3：右击 Static Structural（A5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，如图 13-6 所示。

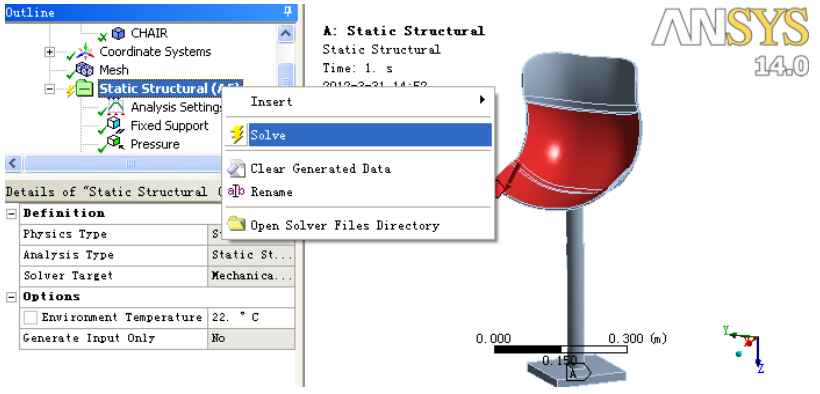


图 13-6　求解计算

5. 添加疲劳分析选项

Step1：右击 Solution（A6）选项，此时会弹出如图 13-7 所示快捷菜单，在快捷菜单中选择 Insert→Fatigue→Fatigue Tool 命令。

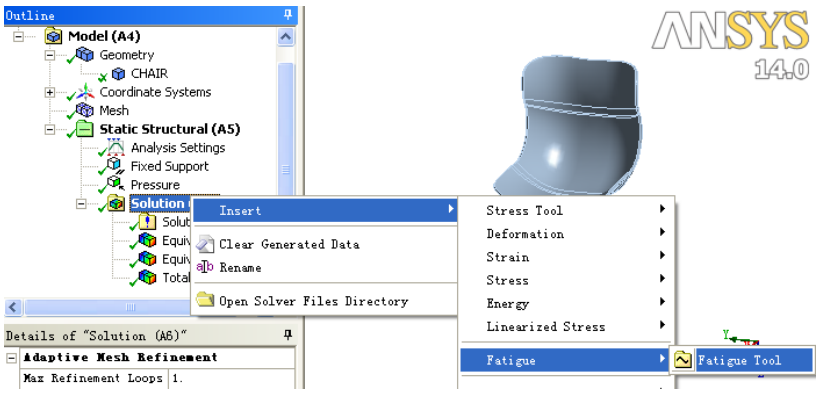


图 13-7　添加屈服分析选项

Step2：选择 Fatigue Tool 选项，如图 13-8 所示，在下面出现的 Details of “Fatigue Tool”面板中做如下设置。

① 在 Fatigue Strength Factor 栏中将数值更改为 0.8。

② 在 Type 栏中选择 Fully Reserved 选项。

③ 在 Analysis Type 中选择 Stress Life 选项。

④ 在 Stress Component 栏中选择 Equivalent（von Mises）选项。

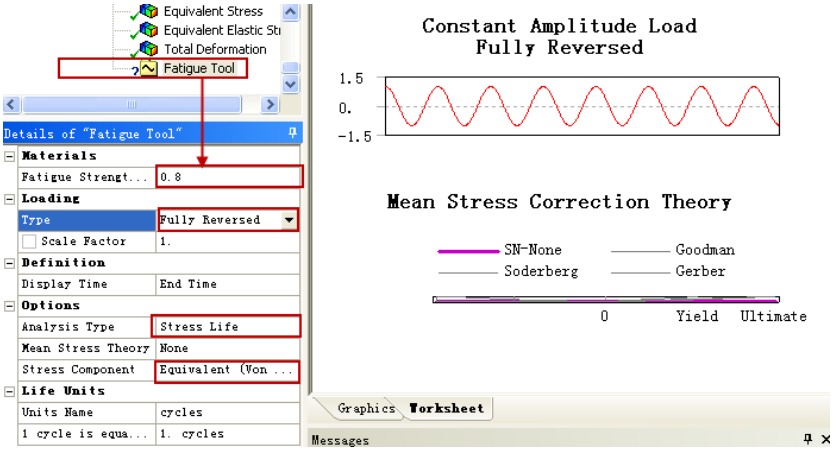


图 13-8　疲劳设置

Step3：右击 Fatigue Tool 选项，在弹出的快捷菜单中依次选择 Insert→Life 命令，如图 13-9 所示。

Step4：用同样操作，可以在 Fatigue Tool 中添加 Safety Factor、Fatigue Sensitivity 两个选项。

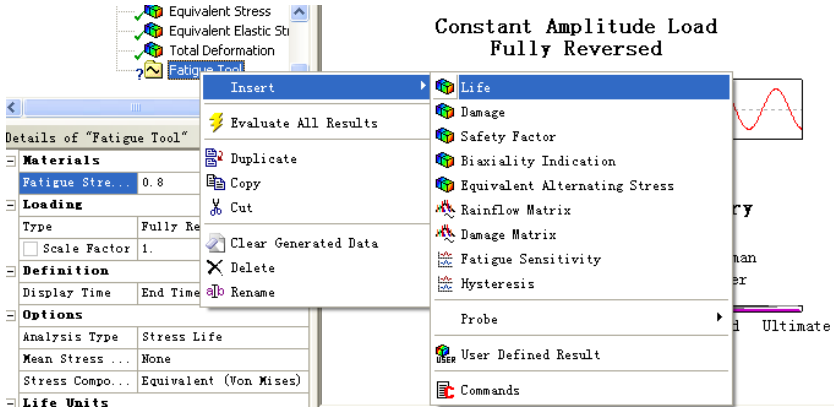


图 13-9　添加 Life 命令

Step5：右击 Fatigue Tool 选项，此时在弹出的如图 13-10 所示的快捷菜单中选择 Evaluate All Result 命令。

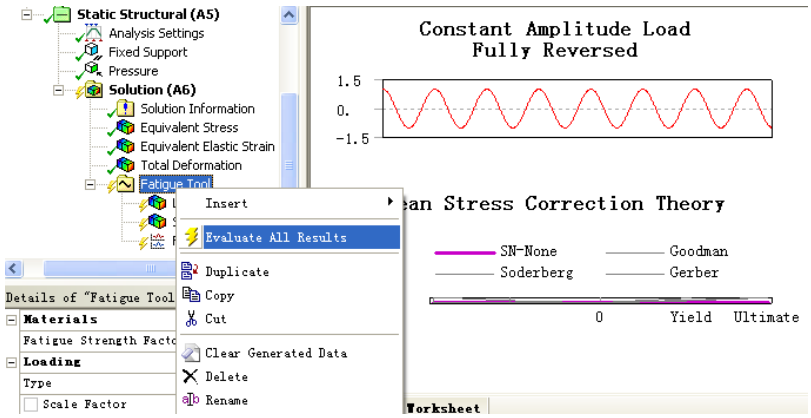


图 13-10　结果后处理

Step6：图 13-11 所示为疲劳寿命显示云图。

Step7：图 13-12 所示为安全因子显示云图。

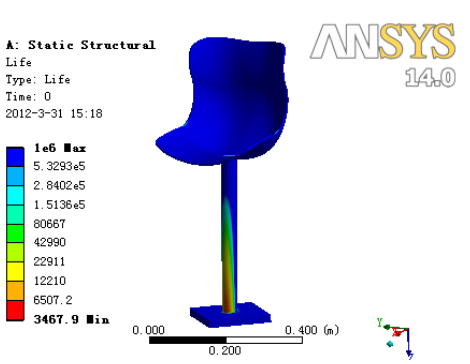


图 13-11　Life 云图显示

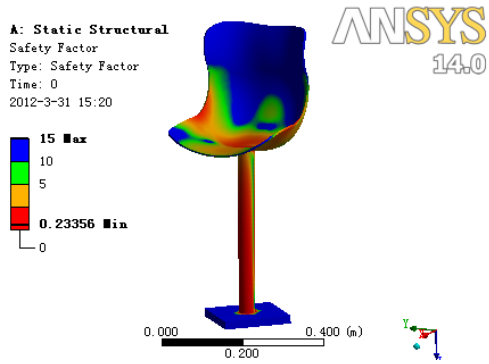


图 13-12　Safety Factor 云图显示

Step8：图 13-13 所示为疲劳寿命曲线。

6. 保存与退出

Step1：单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回 Workbench 主界面。此时主界面中的项目管理区中显示的分析项目均已完成，如图 13-14 所示。

Step2：在 Workbench 主界面中单击常用工具栏中的 Save（保存）按钮。

Step3：单击右上角的（关闭）按钮，退出 Workbench 主界面，完成项目分析。

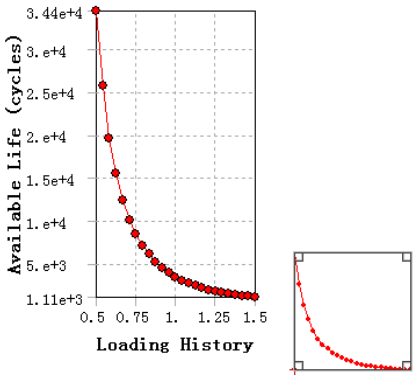


图 13-13　Available Life 曲线



图 13-14　项目管理区中的分析项

13.3 本章小结

本章节通过一个简单的例子介绍了疲劳分析的简单过程，在疲劳分析过程中最重要的是材料关于疲劳的属性设置，图 13-15 所示为材料属性列表，图 13-16 所示为材料疲劳分析相关曲线值。

Properties of Outline Row 4: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
9	Poisson's Ratio	0.3			
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa		
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Strain-Life Parameters				
17	Display Curve Type	Strain-Life			
18	Strength Coefficient	9.2E+08	Pa		
19	Strength Exponent	-0.106			
20	Ductility Coefficient	0.213			
21	Ductility Exponent	-0.47			
22	Cyclic Strength Coefficient	1E+09	Pa		
23	Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2			
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		

图 13-15　疲劳分析属性

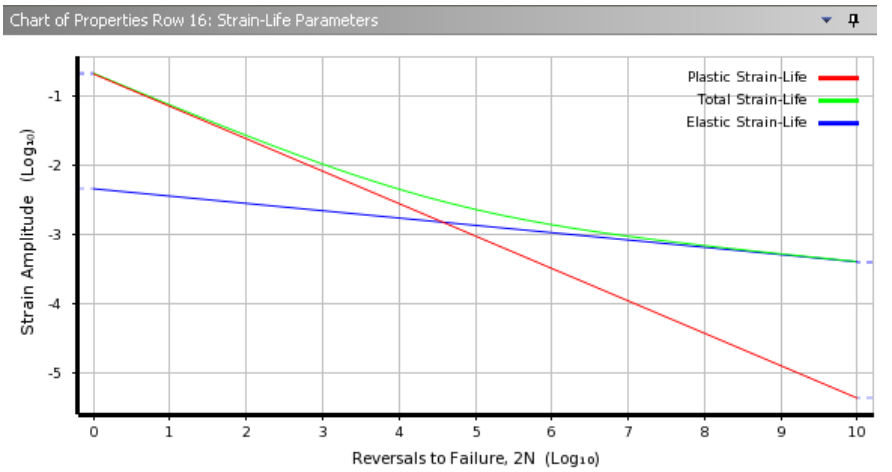


图 13-16　材料疲劳分析相关寿命曲线

在工程中使用疲劳分析时，需要对材料的以上数据进行试验取得。本章节案例仅仅使用软件自带的材料进行疲劳分析。

通过本章节的学习，读者应该对疲劳学分析所必需的参数及整个分析过程有详细的了解。

第 14 章

流体动力学分析及实例详解

ANSYS Workbench 软件的计算流体动力学分析程序有 ANSYS CFX 和 ANSYS FLUENT 两种，两种计算流体力学软件各有优缺点。

ANSYS CFX 作为世界上第一个唯一采用全隐式耦合算法的流体力学分析程序，在算法上具有独特性、具有丰富的物理模型和前后处理，使得 ANSYS CFX 在结果精确性、计算稳定性和灵活性上都有优异的表现。除了一般的工业流动外，ANSYS CFX 还可以模拟如燃烧、多相流、化学反应等复杂流场。

本章将主要讲解 ANSYS CFX 软件的流体动力学分析流程，本章主要介绍 ANSYS CFX 流体动力学分析，讲解内流场及外流场的流体分布计算过程。

学习目标：

（1）熟练掌握 ANSYS CFX 内流场分析的方法及过程。

（2）熟练掌握 ANSYS CFX 外流场分析的方法及过程。

14.1 流体动力学分析简介

计算流体力学是流体力学的一个分支。当前，作为研究流体力学的不可或缺的手段之一的计算流体动力学分析已经在工业、科技等行业中占据了不可替代的作用。

14.1.1 流体动力学分析

1. 计算流体动力学介绍

计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）是通过计算机数值计算和图像显示，对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。

CFD 的基本思想可以归结为把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场，如速度场和压力场，用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替，通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似值 CFD 可以看做是在流动基本方程（质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程）控制下对流动的数值模拟。

通过这种数值模拟，可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量（如

速度、压力、温度、浓度等）的分布，以及这些物理量随时间的变化情况，确定旋涡分布特性、空化特性及脱流区等。

另外，还可据此算出相关的其他物理量，如旋转式流体机械的转矩、水力损失和效率等。此外，与 CAD 联合还可进行结构优化设计等。CFD 方法与传统的理论分析方法、实验测量方法组成了研究流体流动问题的完整体系。

图 14-1 给出了表征三者之间关系的“三维”流体力学示意图。理论分析方法的优点在于所得结果具有普遍性，各种影响因素清晰可见，是指导实验研究和验证新的数值计算方法的理论基础。但是，它往往要求对计算对象进行抽象和简化，才有可能得出理论解。对于非线性情况，只有少数流动才能给出解析结果。

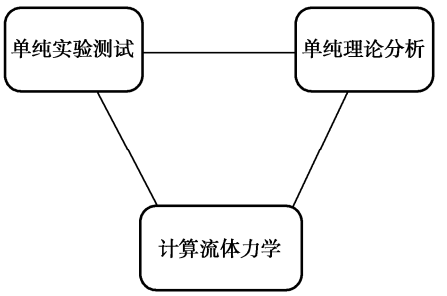


图 14-1 “三维”流体力学示意图

实验测量方法所得到的实验结果真实可信，它是理论分析和数值方法的基础，其重要性不容低估。然而，实验往往受到模型尺寸、流场扰动、人身安全和测量精度的限制，有时可能很难通过试验力一法得到结果。此外，实验还会遇到经费投入、人力和物力的巨大耗费及周期长等许多困难。

而 CFD 方法恰好克服了前面两种方法的弱点，在计算机上实现一个特定的计算。就好像在计算机上做一次物理实验。例如，机翼的绕流，通过计算并将其结果在屏幕上显示，就可以看到流场的各种细节，如激波的运动、强度，涡的生成与传播，流动的分离、表面的压力分布、受力大小及其随时间的变化等。数值模拟可以形象地再现流动情景，与做实验没有什么区别。

2. 计算流体动力学的特点

CFD 的长处是适应性强、应用面广。首先，流动问题的控制方程一般是非线性的，自变量多，计算域的几何形状和边界条件复杂，很难求得解析解，而用 CFD 方法则有可能找出满足工程需要的数值解；其次，可利用计算机进行各种数值试验，例如，选择不同流动参数进行物理方程中各项有效性和敏感性试验，从而进行方案比较。

再者，它不受物理模型和实验模型的限制，省钱省时，有较多的灵活性，能给出详细和完整的资料，很容易模拟特殊尺寸、高温、有毒、易燃等真实条件和实验中只能接近而无法达到的理想条件。CFD 也存在一定的局限性。

首先，数值解法是一种离散近似的计算方法，依赖于物理上合理、数学上适用、适合于在计算机上进行计算的离散的有限数学模型，且最终结果不能提供任何形式的解析

表达式，只是有限个离散点上的数值解，并有一定的计算误差。

第二，它不像物理模型实验一开始就能给出流动现象并定性地描述，往往需要由原体观测或物理模型试验提供某些流动参数，并需要对建立的数学模型进行验证。

第三，程序的编制及资料的收集、繁理与正确利用，在很大程度上依赖于经验与技巧。此外，因数值处理方法等原因有可能导致计算结果的不真实，如产生数值粘性和频散等伪物理效应。

当然，某些缺点或局限性可通过某种方式克服或弥补，这在本书中会有相应介绍。此外，CFD 涉及大量数值计算，因此，常需要较高的计算机软硬件配置。

CFD 有自已的原理、方法和特点，数值计算与理论分析、实验观测相互联系、相互促进，但不能完全替代，三者各有各的适用场合。在实际工作中，需要注意三者有机的结合，争取做到取长补短。

3. 计算流体动力学的应用领域

近十多年来，CFD 有了很大的发展，替代了经典流体力学中的一些近似计算法和图解法。过去的一些典型教学实验，如 Reynolds 实验，现在完全可以借助 CFD 手段在计算机上实现。所有涉及流体流动、热交换、分子输运等现象的问题，几乎都可以通过计算流体力学的方法进行分析和模拟。

CFD 不仅作为一个研究工具，而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、环境工程、食品工程、海洋结构工程、工业制造等领域发挥作用。典型的应用场合及相关的工程问题包括以下几种。

- 水轮机、风机和泵等流体机械内部的流体流动。
- 飞机和航天飞机等飞行器的设计。
- 汽车流线外型对性能的影响。
- 洪水波及河口潮流计算。
- 风载荷对高层建筑物稳定性及结构性能的影响。
- 温室及室内的空气流动及环境分析。
- 电子元器件的冷却。
- 换热器性能分析及换热器片形状的选取。
- 河流中污染物的扩散。
- 汽车尾气对街道环境的污染。
- 食品中细菌的运移。

对这些问题的处理，过去主要借助于基本的理论分析和大量的物理模型实验，而现在大多采用 CFD 的方式加以分析和解决，CFD 技术现已发展到完全可以分析三维粘性湍流及旋涡运动等复杂问题的程度。

4. 计算流体动力学的分支

经过四十多年的发展，CFD 出现了多种数值解法。这些方法之间的上要区别在于对控制方程的离散方式。根据离散的原理不同，CFD 大体上可分为三个分支。

- 有限差分法（Finite Difference Method，FDM）。
- 有限元法（Finite Element Method，FEM）。
- 有限体积法（Finite Volume Method，FVM）。

有限差分法是应用最早、最经典的 CFD 方法，它将求解域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解域，然后将偏微分方程的导数用差商代替，推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组。求出差分方程组的解，就是微分方程定解问题的数值近似解。它是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法。

这种方法发展较早，比较成熟，较多地用于求解双曲型和抛物型问题。在此基础上发展起来的方法有 PIC（Particle-in-Cell）法、MAC（Marker-and-cell）法，以及由美籍华人学者陈景仁提出的有限分析法（Finite Analytic Method）等有限元法，它是 20 世纪 80 年代开始应用的一种数值解法，它吸收了有限差分法中离散处理的内核，又采用了变分计算中选择逼近函数对区域进行积分的合理方法。

有限元法因求解速度较有限差分法和有限体积法慢，因此应用不是特别广泛。在有限元法的基础上，英国 C.A.Brebbia 等提出了边界元法和混合元法等方法。

有限体积法是将计算区域划分为一系列控制体积，将待解微分方程对每一个控制体积积分得出离散方程。有限体积法的关键是在导出离散方程过程中，需要对界面上的被求函数本身及其导数的分布作出某种形式的假定，用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒特性，而且离散方程系数物理意义明确，计算量相对较小。

1980 年，S.V.Patanker 在其专著《Numerical Heat Transfer and FluidFlow》中对有限体积法作了全面的阐述。此后，该方法得到了广泛应用，是目前 CFD 应用最广的一种方法。当然，对这种方法的研究和扩展也在不断进行，如 P.Chow 提出了适用于任意多边形非结构网格的扩展有限体积法等。

14.1.2 基本控制方程

1. 系统与控制体

在流体力学中，系统是指某一确定流体质点集合的总体。系统以外的环境称为外界。分隔系统与外界的界面，称为系统的边界。系统通常是研究的对象，外界则用来区别于系统。

系统将随系统内质点一起运动，系统内的质点始终包含在系统内，系统边界的形状和所围空间的大小可随运动而变化。系统与外界无质量交换，但可以有力的相互作用及能量（热和功）交换。

控制体是指在流体所在的空间中，以假想或真实流体边界包围，固定不动形状任意的空间体积。包围这个空间体积的边界面，称为控制面。

控制体的形状与大小不变，并相对于某坐标系固定不动。控制体内的流体质点组成并非不变的。控制体既可通过控制面与外界有质量和能量交换，也可与控制体外的环境有力的相互作用。

2. 质量守恒方程（连续性方程）

在流场中，流体通过控制面 A_1 流入控制体，同时也会通过另一部分控制面 A_2 流出控制体，在这期间控制体内部的流体质量也会发生变化。按照质量守恒定律，流入的质量与流出的质量之差，应该等于控制体内部流体质量的增量，由此可导出流体流动连续性方程的积分形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V \rho \mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z + \iint_A \rho v \cdot n \mathrm{d}A = 0 \tag{14-1}$$

式中，V 表示控制体；A 表示控制面。等式左边第一项表示控制体 V 内部质量的增量；第二项表示通过控制表面流入控制体的净通量。

根据数学中的奥高公式，在直角坐标系下可将其化为微分形式，即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v\frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w\frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{14-2}$$

对于不可压缩均质流体，密度为常数，则有

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{14-3}$$

对于圆柱坐标系，其形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho v_r}{r} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_\theta)}{r\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \tag{14-4}$$

对于不可压缩均质流体，密度为常数，则有

$$\frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_\theta}{r\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{14-5}$$

3. 动量守恒方程（运动方程）

动量守恒是流体运动时应遵循的另一个普遍定律，描述为在一给定的流体系统，其动量的时间变化率等于作用于其上的外力总和，其数学表达式即为动量守恒方程，也称为运动方程，或 N-S 方程，其微分形式表达如下：

$$\begin{cases} \rho\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} = \rho F_{bx} + \dfrac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \dfrac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \dfrac{\partial p_{zx}}{\partial z} \\ \rho\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = \rho F_{by} + \dfrac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \dfrac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \dfrac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho\dfrac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t} = \rho F_{bz} + \dfrac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \dfrac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \dfrac{\partial p_{zz}}{\partial z} \end{cases} \tag{14-6}$$

式中，F_{bx}、F_{by}、F_{bz} 分别是单位质量流体上的质量力在三个方向上的分量；p_{yx} 是流体内应力张量的分量。

动量守恒方程在实际应用中有许多表达形式，其中比较常见的有如下几种。

1）可压缩粘性流体的动量守恒方程

$$\begin{cases}\rho\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=\rho f_x+\dfrac{\partial p}{\partial x}+\dfrac{\partial}{\partial x}\left\{\mu\left[2\dfrac{\partial u}{\partial x}-\dfrac{2}{3}\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\right]\right\}+\\ \qquad\dfrac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}+\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)\right]+\dfrac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\dfrac{\partial w}{\partial x}+\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)\right]\\ \rho\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho f_y+\dfrac{\partial p}{\partial y}+\dfrac{\partial}{\partial y}\left\{\mu\left[2\dfrac{\partial v}{\partial y}-\dfrac{2}{3}\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\right]\right\}+\\ \qquad\dfrac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\dfrac{\partial v}{\partial z}+\dfrac{\partial w}{\partial y}\right)\right]+\dfrac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}+\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)\right]\\ \rho\dfrac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}=\rho f_z+\dfrac{\partial p}{\partial z}+\dfrac{\partial}{\partial z}\left\{\mu\left[2\dfrac{\partial w}{\partial z}-\dfrac{2}{3}\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\right]\right\}+\\ \qquad\dfrac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\dfrac{\partial w}{\partial x}+\dfrac{\partial u}{\partial z}\right)\right]+\dfrac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\dfrac{\partial v}{\partial z}+\dfrac{\partial w}{\partial z}y\right)\right]\end{cases}\tag{14-7}$$

2）常粘性流体的动量守恒方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho F-\mathrm{grad}p+\frac{\mu}{3}\mathrm{grad}(\mathrm{div}v)+\mu\nabla^2 v \tag{14-8}$$

3）常密度常粘性流体的动量守恒方程

$$\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho F-\mathrm{grad}p+\mu\nabla^2 v \tag{14-9}$$

4）无粘性流体的动量守恒方程（欧拉方程）

$$\rho\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\rho F-\mathrm{grad}p \tag{14-10}$$

5）静力学方程

$$\rho F=\mathrm{grad}p \tag{14-11}$$

6）相对运动方程

在非惯性参考系中的相对运动方程是研究大气、海洋及旋转系统中流体运动时所必须考虑的内容。由理论力学得知，绝对速度 v_a 为相对速度 v_r 及牵连速度 v_e 之和，即

$$v_a=v_r+v_e \tag{14-12}$$

式中，$v_e=v_0+\Omega\times r$；v_0 为运动系中的平动速度；Ω 是其转动角速度；r 为质点矢径。

而绝对加速度 a_a 为相对加速度 a_r、牵连加速度 a_e 及科氏加速度 a_c 之和，即

$$a_a=a_r+a_e+a_c \tag{14-13}$$

式中，$a_e=\dfrac{\mathrm{d}v_0}{\mathrm{d}t}+\dfrac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t}\times r+\Omega\times(\Omega\times r)$，$a_c=2\Omega\times v_r$。

将绝对加速度代入运动方程，则得到流体的相对运动方程，即

$$\rho\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}=\rho F_{\mathrm{b}}+\mathrm{div}P-a_{\mathrm{c}}-2\Omega v_{\mathrm{r}} \tag{14-14}$$

4. 能量守恒方程

将热力学第一定律应用于流体运动，把式（14-14）各项用有关的流体物理量表示出来，就是能量方程，即

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E+p)]=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[k_{\mathrm{eff}}\frac{\partial T}{\partial x_i}-\sum_{j'}h_{j'}J_{j'}+u_j(\tau_{ij})_{\mathrm{eff}}\right]+S_h \tag{14-15}$$

式中，$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{u_i^2}{2}$；$k_{\mathrm{eff}}$ 是有效热传导系数，$k_{\mathrm{eff}}=k+k_{\mathrm{t}}$，其中，$k_{\mathrm{t}}$ 是湍流热传导系数，根据所使用的湍流模型来定义；$J_{j'}$ 是组分 j 的扩散流量；S_h 包括了化学反应热及其他用户定义的体积热源项；方程右边的前三项分别描述了热传导、组分扩散和粘性耗散带来的能量输运。

14.2 项目案例 1——三通流体动力学分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的流体动力学分析模块 ANSYS CFX，计算三通管道的流动特性。

学习目标：熟练掌握 ANSYS CFX 内流场分析的基本方法及操作过程。

模型文件	光盘\model\santong.x_t
结果文件	光盘\example\Inner_Fliud.wbpj

1. 问题描述

如图 14-2 所示为某三通模型，进口 1 流速为 5m/s，温度为 80℃，进口 2 流速为 2m/s，温度为 10℃，出口为标准大气压，请用 ANSYS CFX 分析流动特性。

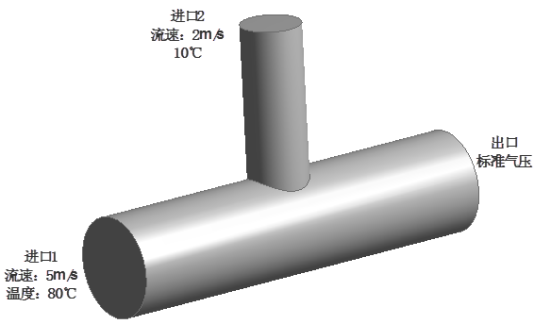


图 14-2　实体梁模型

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 14-3 所示。

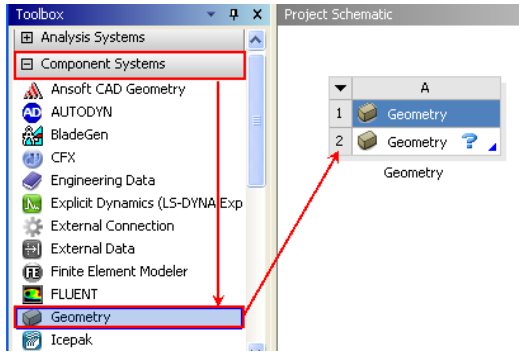


图 14-3　创建分析项目 A

3. 创建几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 14-4 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出的如图 14-5 所示的“打开”对话框中，将文件类型设置成 Parasolid 格式，然后选择 santong.x_t 文件，单击“打开”按钮。

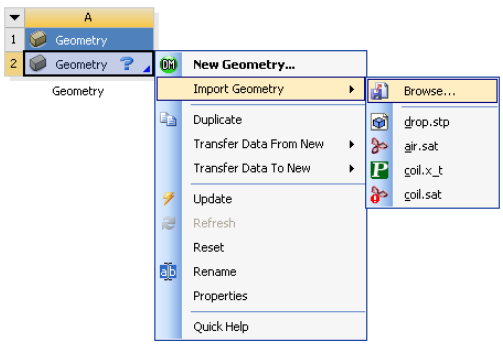


图 14-4　导入几何体

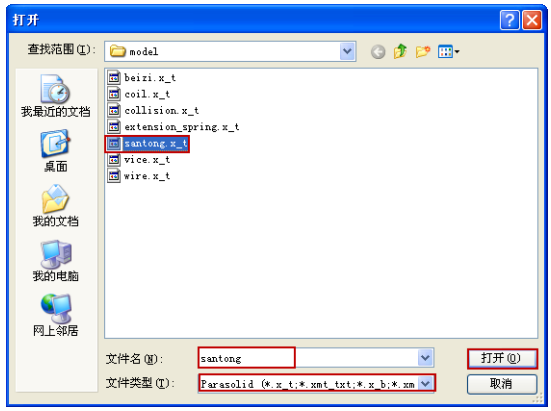


图 14-5　打开对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 栏，此时会启动如图 14-6 所示的 DesignModeler 平台，设置单位为 mm，关闭“单位设置”对话框。

Step4：如图 14-7 所示，单击工具栏中的 Generate 按钮生成几何图形。

Step5：单击工具栏中的（保存）按钮，保存文件为 Inner_Fliud，单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回 Workbench 主界面。

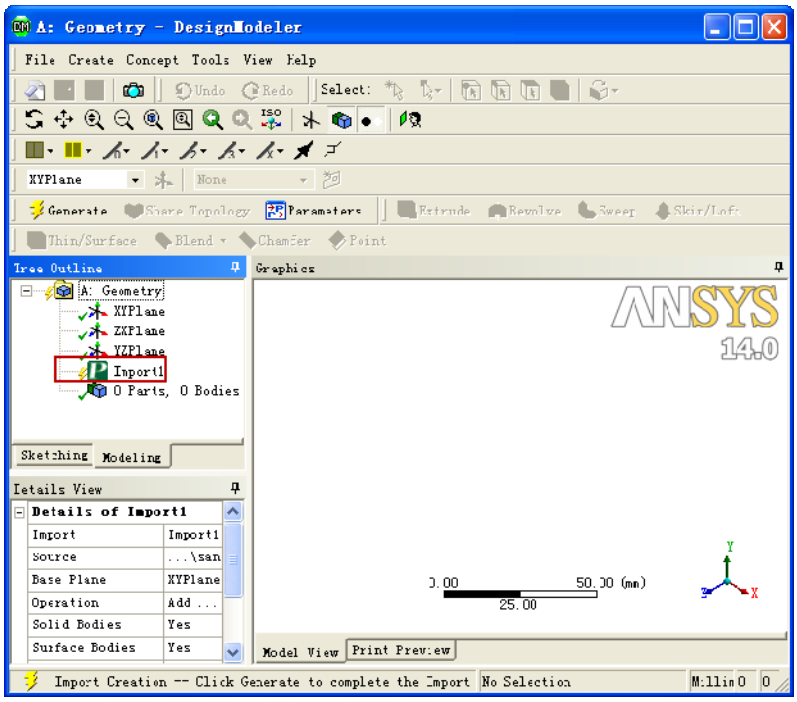


图 14-6　启动 DesignModeler

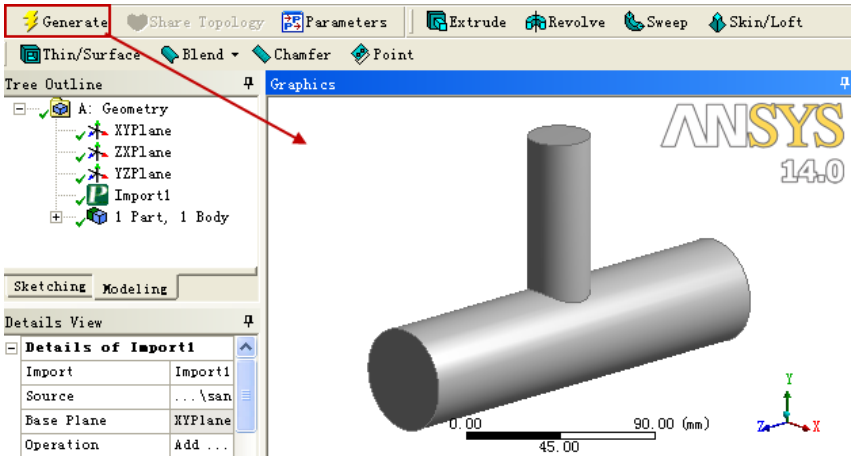


图 14-7　生成几何

4. 流体动力学分析

选择主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Fluid Flow（CFX）（CFX 流体动力学分析）命令，如图 14-8 所示，然后将鼠标移动到项目 A 的 A2（Geometry）中，此时在项目 A 的右侧出现一个项目 B，项目 A 与项目 B 的几何数据实现共享。

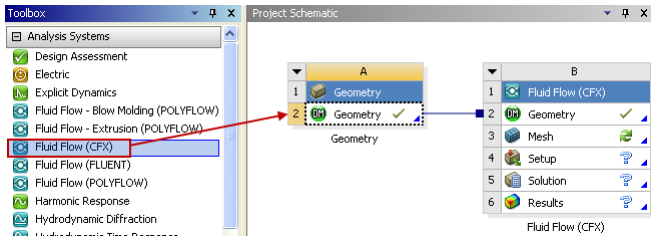


图 14-8　创建流体动力学分析

5. 网格划分

Step1：双击项目 B 中的 B3（Mesh）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 14-9 所示。

Step2：右击 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时会弹出如图 14-10 所示的网格划分方式快捷菜单，在快捷菜单中选择 Insert→Inflation 命令。

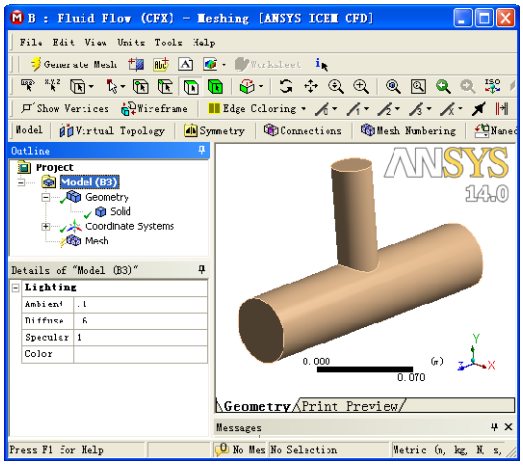


图 14-9　Mechanical 界面

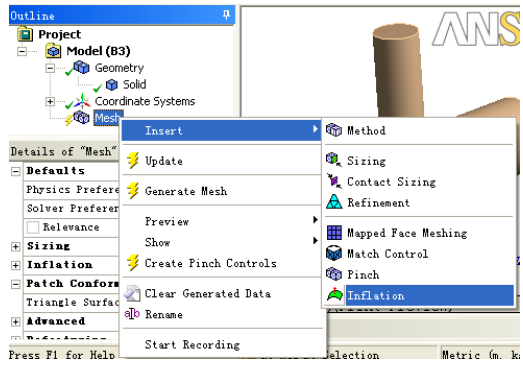


图 14-10　网格设置

Step3：在如图 14-11 所示的 Details of "Inflation"面板中做如下设置：

① 单击实体，确保 Geometry 栏中显示 1Body，表明三通实体被选中。

② 选择圆柱外表面，单击 Boundary 栏中的 Apply 按钮。

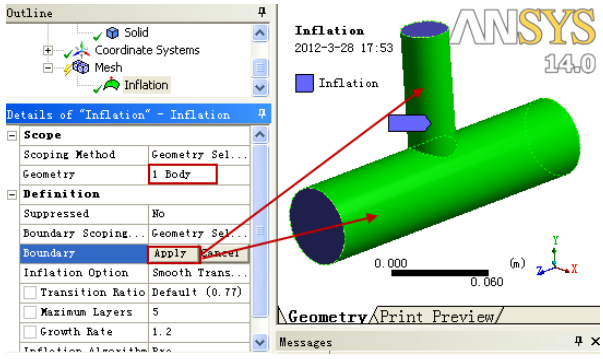


图 14-11　设置膨胀层

Step4：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 14-12 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 14-13 所示。

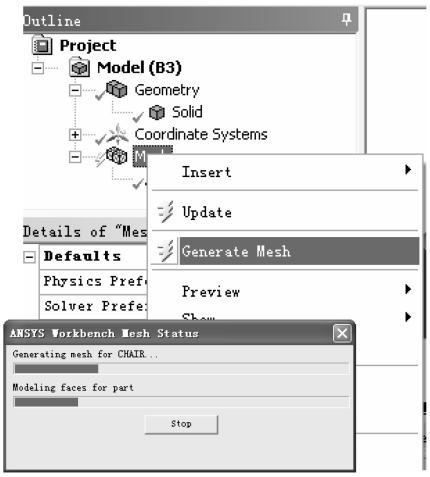


图 14-12　划分网格

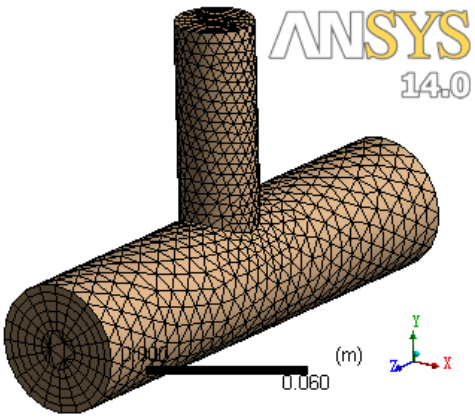


图 14-13　网格效果

Step5：单击（面选择器）按钮，然后选择热水入口，右击后在弹出的如图 14-14 所示的快捷菜单中选择 Create Named Selection 命令。

Step6：此时在弹出的如图 14-15 所示的 Selection Name 对话框中的 Enter a name for the selection group 中输入 Inlet_hot。

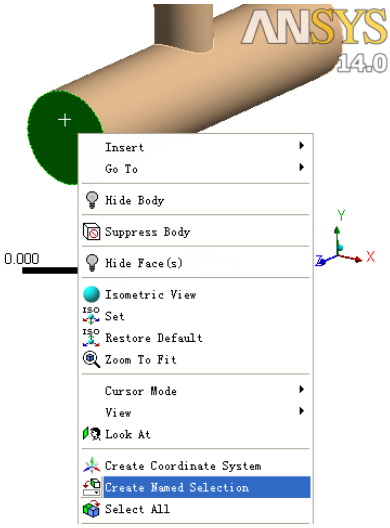


图 14-14　跨界菜单



图 14-15　截面命名

Step7：同理，将其他两个截面分别设置为 Inlet_cool 和 Outlet，如图 14-16 所示。

Step8：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回 Workbench 主界面。

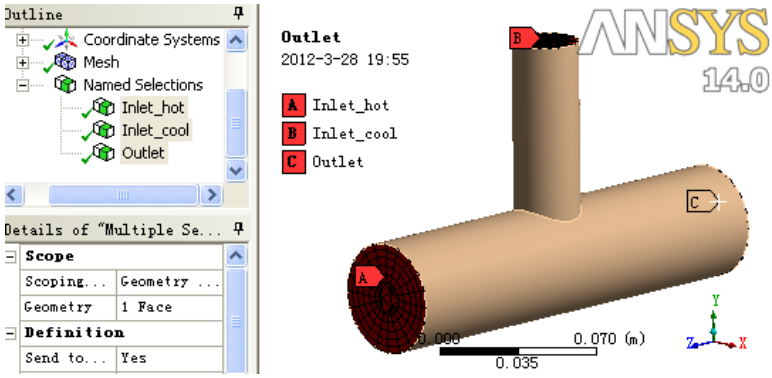


图 14-16　界面命名

6. 流体动力学前处理

Step1：返回 Workbench 主界面，右击如图 14-17 所示 B3（Mesh）栏，在弹出来的快捷菜单中选择 Update 命令。

Step2：双击项目 B 中的 B4（Setup）栏，此时加载如图 14-18 所示 Fluid Flow（CFX）流体力学前处理平台。

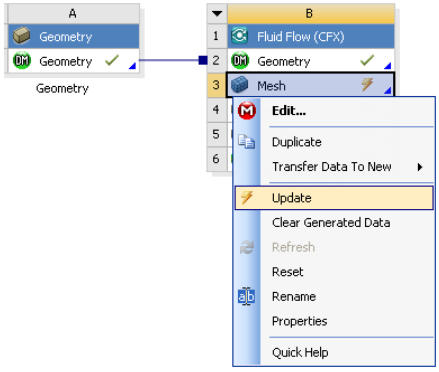


图 14-17　数据更新

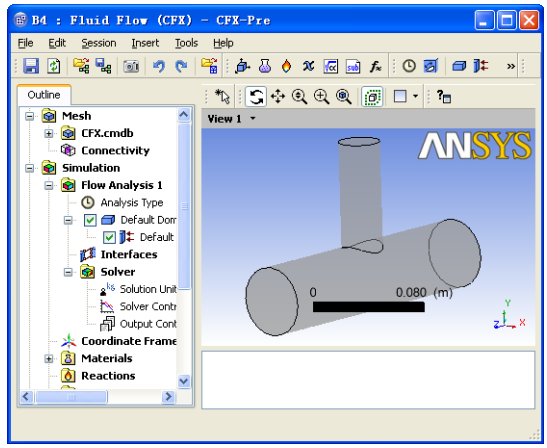


图 14-18　CFX—Pre 截面

Step3：双击如图 14-19 所示的 Default Domain 选项，此时会弹出计算域设置面板。

Step4：在如图 14-20 所示的“计算域设置”对话框中的 Basic Settings 选项卡的 Material 中选择 Water 材料。

Step5：单击 Fluid Models 选项卡，如图 14-21 所示，在 Option 栏中选择 Thermal Energy 选项，单击 OK 按钮。

Step6：单击工具栏中的（边界设置）按钮，在弹出来的如图 14-22 所示的 Insert Boundary 对话框中的 Name 栏中输入 Inlet_hot，单击 OK 按钮确定。

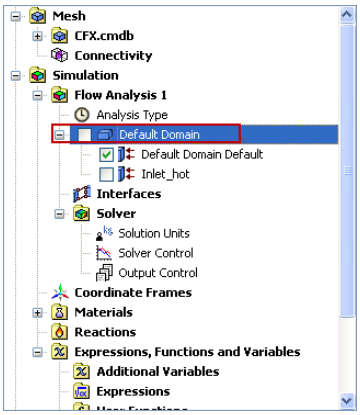


图 14-19　计算域

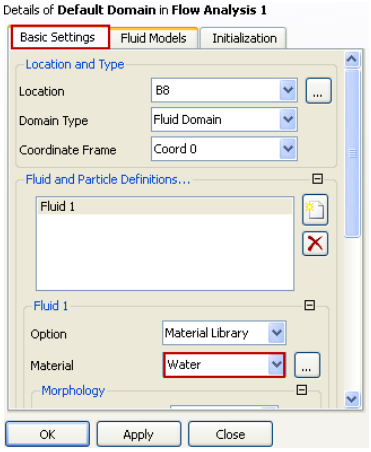


图 14-20　设置计算域

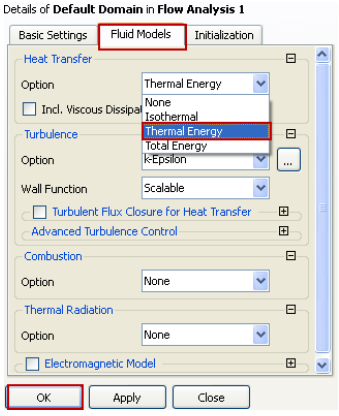


图 14-21　设置计算域

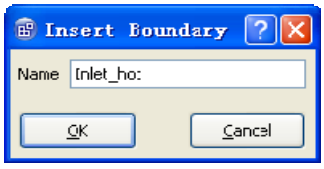


图 14-22　添加入口（一）

Step7：此时弹出如图 14-23 所示的 Boundary：Inlet_hot 对话框，在对话框中的 Basic Settings 选型卡中做如下设置。

① 在 Boundary Type 栏中选择 Inlet 选项。

② 在 Location 栏中选择 Inlet_hot 选项，单击 OK 按钮确定。

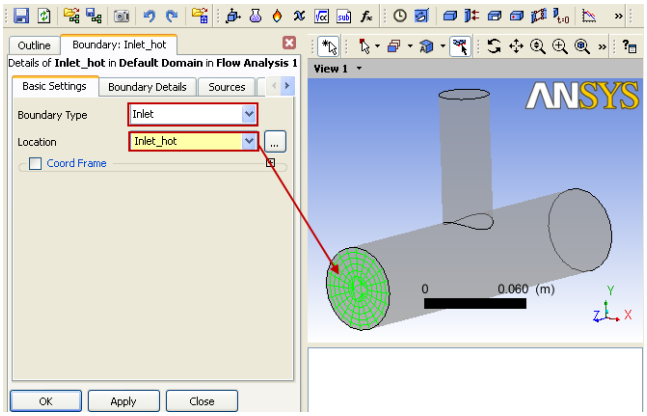


图 14-23　入口设置（一）

Step8：单击 Boundary Details 选项卡，在如图 14-24 所示的面板中做以下输入。

① Normal Speed 栏中输入 5m/s。

② 在 Static Temperature 栏中输入 80[C]单击 OK 按钮。

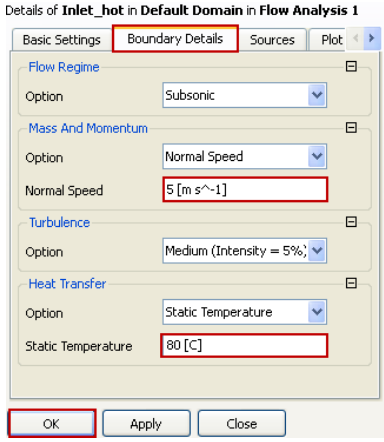


图 14-24　入口设置（二）

Step9：同样单击工具栏中的（边界设置）按钮，在弹出的对话框中输入 Inlet_cool，单击 OK 按钮，在出现的如图 14-25 所示的 Boundary：Inlet_cool 对话框，在对话框中的 Basic Settings 选型卡中做如下设置。

① 在 Boundary Type 栏中选择 Inlet 选项。

② 在 Location 栏中选择 Inlet_cool 选项，单击 OK 按钮确定。

Step10：单击如图 14-26 所示的 Boundary Details 选项卡，在选项卡中做如下设置。

① 在 Normal Speed 栏中输入 2m/s。

② 在 Static Temperature 栏中输入 10[C]，单击 OK 按钮确定。

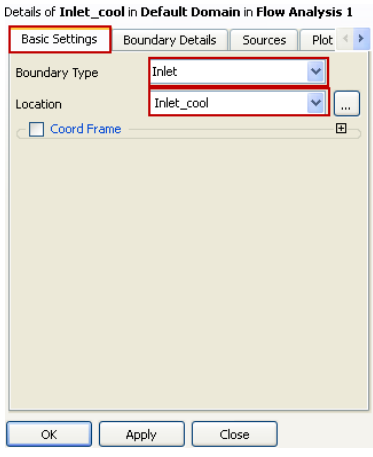


图 14-25　添加入口（二）

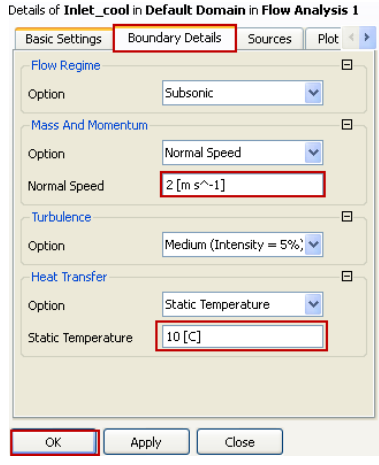


图 14-26　入口设置（三）

Step11：同样单击工具栏中的（边界设置）按钮，在弹出的对话框中输入 Onlet，单击 OK 按钮，在出现的如图 14-27 所示的 Boundary：Onlet 对话框，在对话框中做如下设置。

① 在 Boundary Type 栏中选择 Onlet 选项。

② 在 Location 栏中选择 Onlet 选项，单击 OK 按钮确定。

Step12：单击如图 14-28 所示的 Boundary Details 选项卡，在选项卡中做如下设置。在 Relative Pressure 栏中输入 1[atm]，单击 OK 按钮确定。

Step13：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Fluid Flow（CFX）界面右上角的（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFX）返回到 Workbench 主界面。

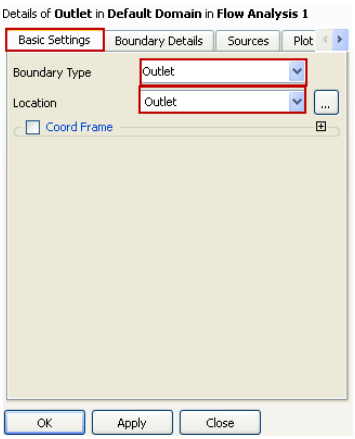


图 14-27　添加出口

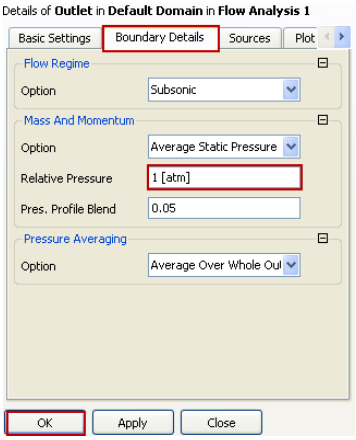


图 14-28　出口设置

7. 流体计算

Step1：在 Workbench 主界面中双击项目 B 的 B5（Solution）栏，此时会弹出如图 14-29 所示的求解器对话框。保持其余默认，单击 Start Run 按钮，进行计算。

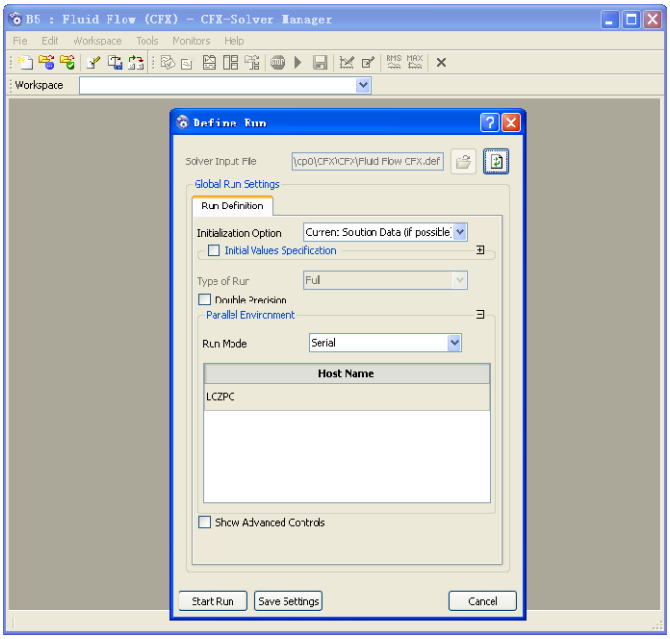


图 14-29　求解（一）

Step2：此时会出现如图 14-30 所示的“计算过程监察”对话框，对话框左侧为残差曲线，右侧为计算过程。

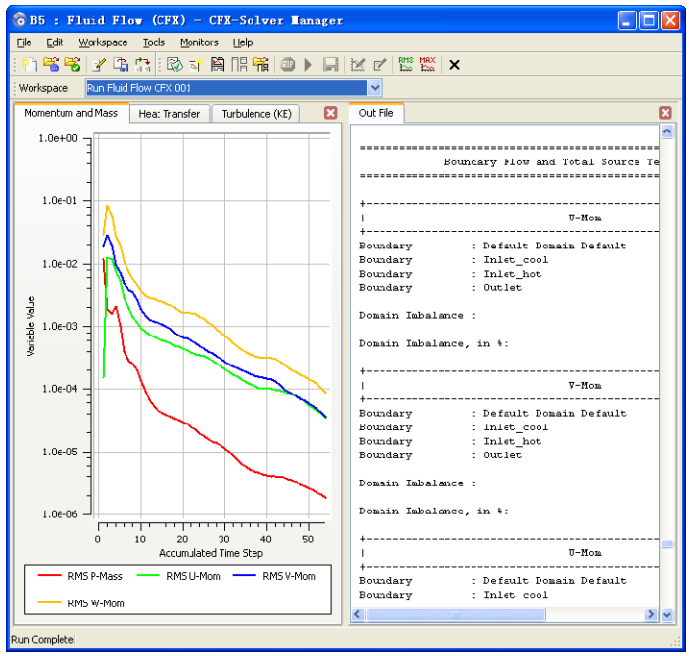


图 14-30　求解（二）

Step3：计算完成后会弹出如图 14-31 所示对话框，单击 OK 按钮确定。



图 14-31　求解完成

Step4：单击 Fluid Flow（CFX）界面右上角的（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFX）返回 Workbench 主界面。

8. 结果后处理

Step1：返回 Workbench 主界面后，双击项目 B 中的 B6（Result）栏，此时会出现如图 14-32 所示的 CFD-Post 平台。

Step2：在工具栏中单击按钮，在弹出的如图 14-33 所示的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step3：在如图 14-34 所示的 Details of Streamline 1 面板中的 Start From 栏中选择 Inlet_hot 和 Inlet_cool 两项，其余默认，单击 Apply 按钮。

注：选择时可以同时按下 Ctrl 键进行多对象选择。

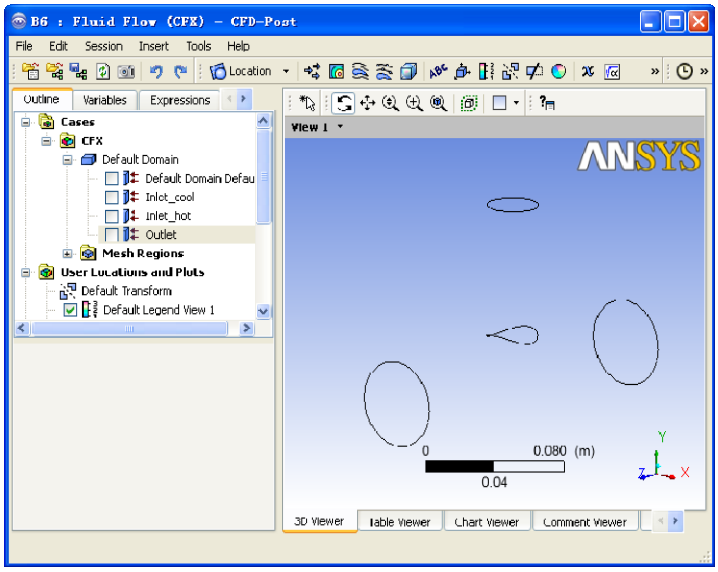


图 14-32　后处理界面

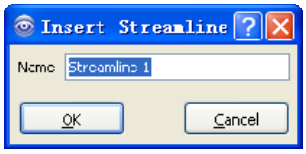


图 14-33　创建流迹线

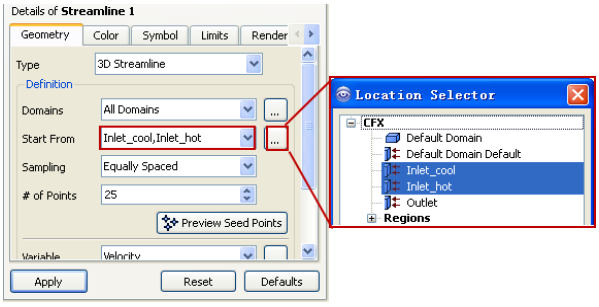


图 14-34　设置流迹线

Step4：图 14-35 所示为流体流速迹线图。

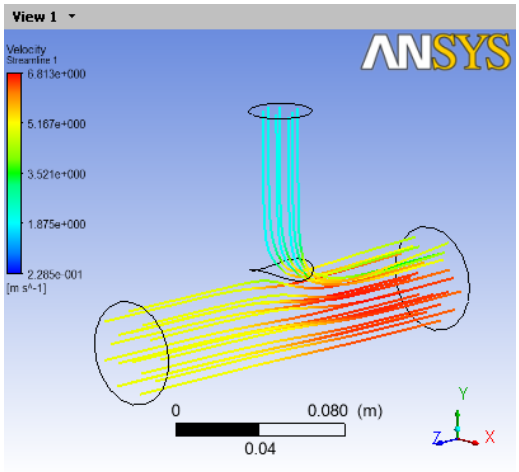


图 14-35　流迹线云图

Step5：在工具栏中单击按钮，在弹出的如图 14-36 所示的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step6：在如图 14-37 所示的 Details of Contour 1 面板中的 Variable 栏中选择 Temperature 选项，其余默认，单击 Apply 按钮。

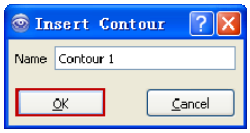


图 14-36　创建云图

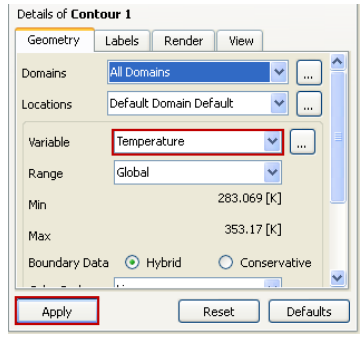


图 14-37　设置云图

Step7：如图 14-38 所示为流体温度场分布云图。

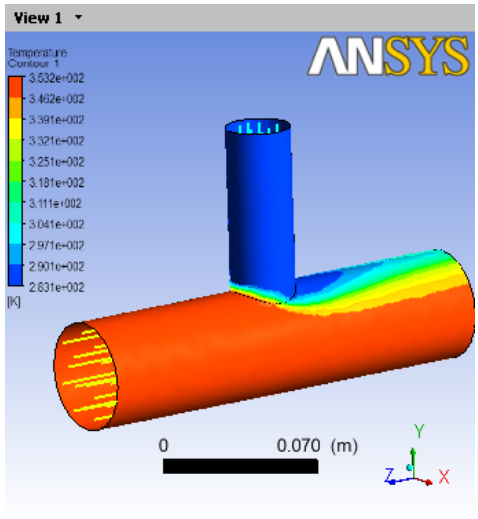


图 14-38　温度分布云图

Step8：读者也可以在工具栏中添加其他命令，这里不再讲述。

Step9：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Fluid Flow（CFD-Post）界面右上角的（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFD-Post）返回 Workbench 主界面。

14.3　项目案例 2——叶轮外流场分析

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的流体动力学分析模块 ANSYS CFX，计算外部流场的流动特性。

学习目标：熟练掌握 ANSYS CFX 外流场分析的基本方法及操作过程。

模型文件	光盘\model\ss.stp
结果文件	光盘\example\Outer_Fluid.wbpj

1. 问题描述

如图 14-39 所示为某三通模型，进口 1 流速为 5m/s，出口为标准大气压，请用 ANSYS CFX 分析流动特性。

2. 启动 Workbench 并建立分析项目

Step1：在 Windows 系统下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，启动 ANSYS Workbench 14.0，进入主界面。

Step2：双击主界面 Toolbox（工具箱）中的 Component Systems→Geometry（几何）命令，即可在 Project Schematic（项目管理区）创建分析项目 A，如图 14-40 所示。

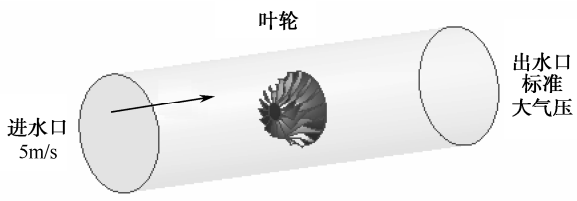


图 14-39　实体梁模型

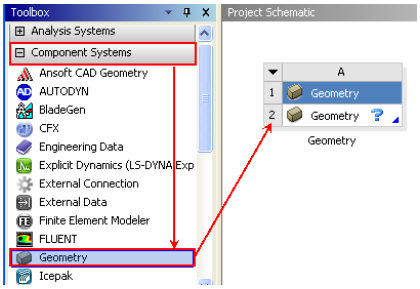


图 14-40　创建分析项目 A

3. 创建几何体模型

Step1：在 A2 Geometry 上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，如图 14-41 所示，此时会弹出“打开”对话框。

Step2：在弹出如图 14-42 所示的“打开”对话框中，将文件类型设置成 STEP 格式，然后选择 ss.stp 文件，单击“打开”按钮。

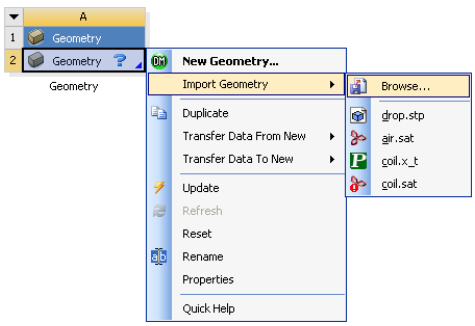


图 14-41　导入几何体

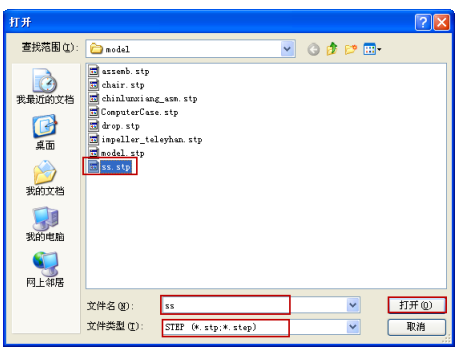


图 14-42　“打开”对话框

Step3：双击项目 A 中的 A2 栏，此时会启动如图 14-43 所示的 DesignModeler 平台，设置单位为 mm，关闭“单位设置”对话框。

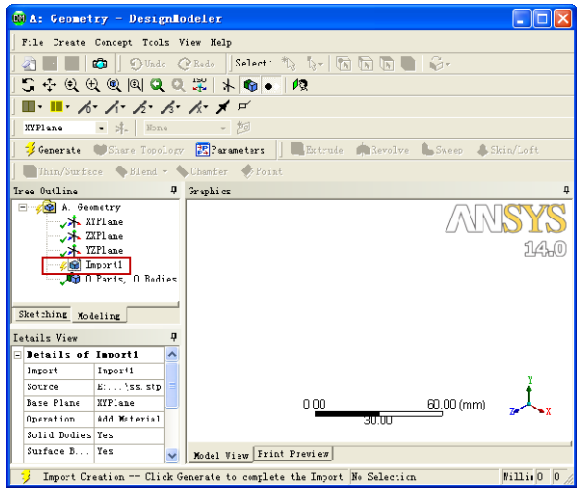


图 14-43　启动 DesignModeler

Step4：如图 14-44 所示，单击工具栏中的 Generate 按钮生成几何图形。

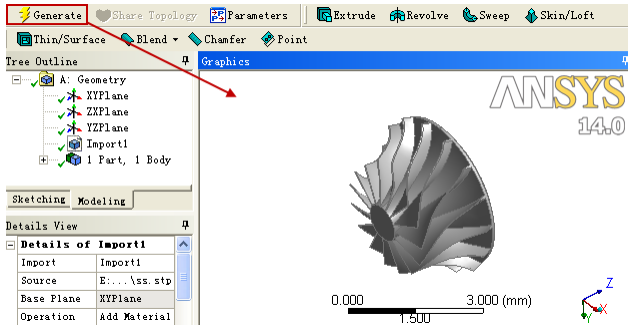


图 14-44　生成几何

4. 创建外部流场

Step1：选择 Tools 菜单中的 Enclosure（包围）子菜单，如图 14-45 所示。

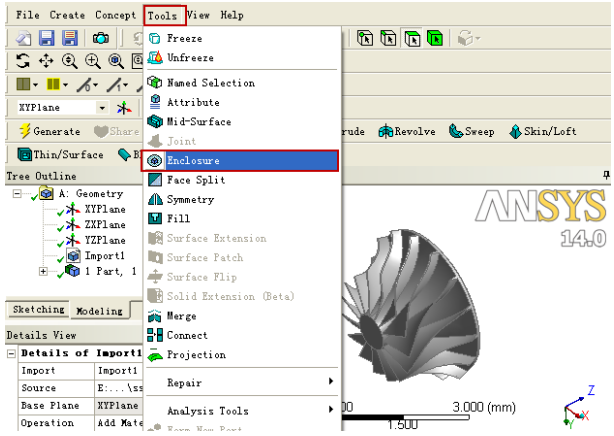


图 14-45　Enclosure 子菜单

Step2：在如图 14-46 所示的 Details View 面板中做如下设置。

① 在 Shape 中选择 Cylinder 选项，建立圆柱模型。

② 在 Cylinder Alignment 栏中选择 Z-Axis 选项，此选项表明圆柱的方向为沿着 *Z* 轴。

③ 在 Cushion 栏中选择 Non-Uniform 选项，可以设置三个方向的距离不一致。

④ 在 FD1 中输入 1mm。

⑤ 在 FD2 中输入 10mm。

⑥ 在 FD3 中输入 10mm，单击 Generate 按钮生成几何图形。

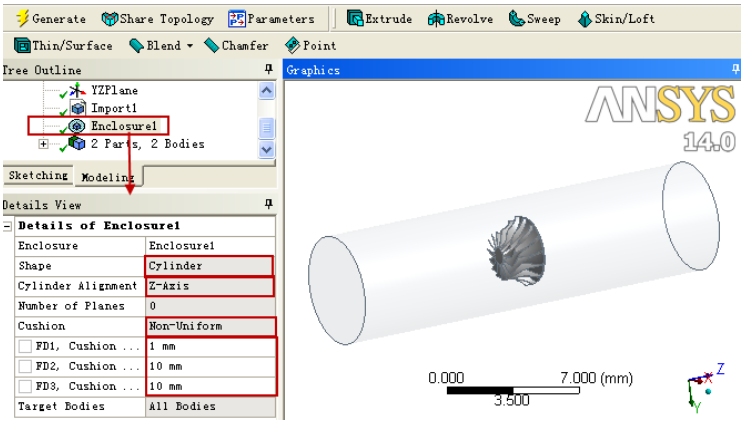


图 14-46　Enclosure 细节设置

Step3：单击工具栏中的（保存）按钮，保存文件为 Outer_Fluid，单击 DesignModeler 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回 Workbench 主界面。

5. 流体动力学分析

选择主界面 Toolbox（工具箱）中的 Analysis Systems→Fluid Flow（CFX）（CFX 流体动力学分析）命令，如图 14-47 所示，然后将鼠标移动到项目 A 的 A2（Geometry）中，此时在项目 A 的右侧出现一个项目 B，项目 A 与项目 B 的几何数据实现共享。

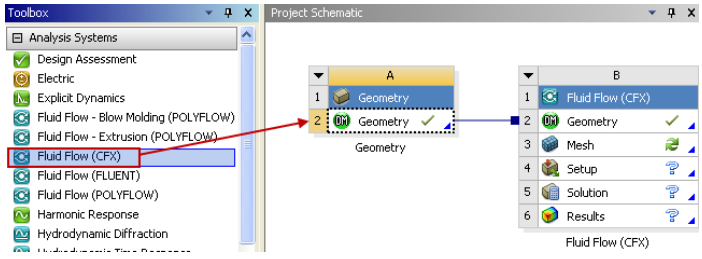


图 14-47　创建流体动力学分析

6. 网格划分

Step1：双击项目 B 中的 B3（Mesh）选项，此时会出现 Mechanical 界面，如图 14-48 所示。

Step2：右击 Mechanical 界面左侧 Outline（分析树）中的 Mesh 选项，此时会弹出如图 14-49 所示的网格划分方式快捷菜单，在快捷菜单中选择 Insert→Inflation 命令。

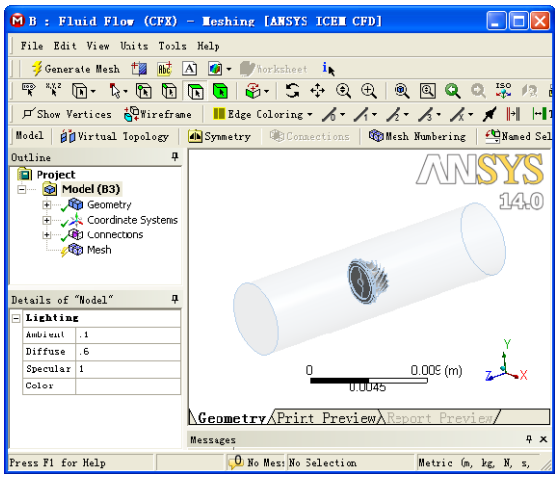


图 14-48　Mechanical 界面

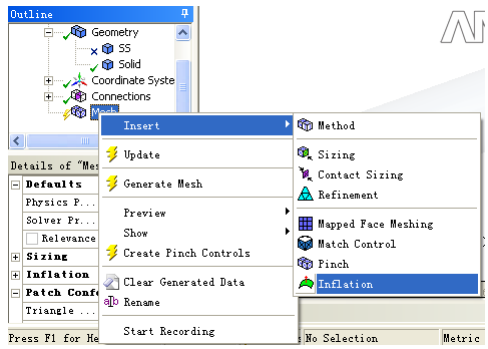


图 14-49　网格设置

Step3：在如图 14-50 所示的 Details of "Inflation"面板中做如下设置。

① 单击实体，确保 Geometry 栏中显示 1Body，表明实体被选中。

② 选择圆柱外表面，单击 Boundary 栏中的 Apply 按钮。

Step4：几何抑制。右击 Outline 中的 Geometry→ss 模型文件，在弹出来的如图 14-51 所示的快捷菜单中选择 Suppress Body 命令，此时 ss 模型将被抑制。

注：抑制后的网格将不会在后续的计算中考虑。

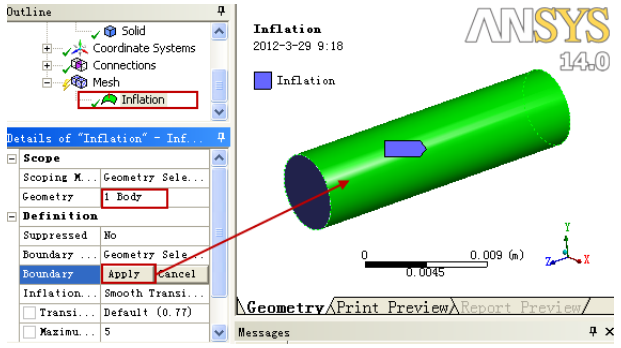


图 14-50　设置膨胀层

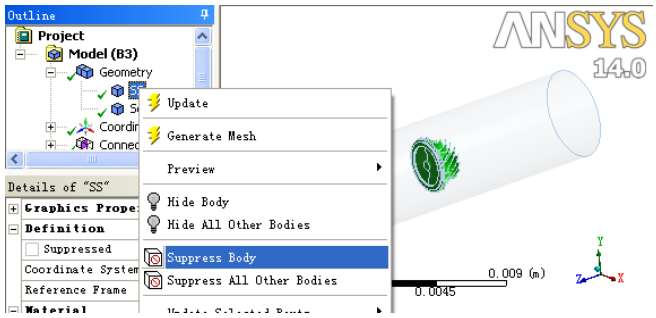


图 14-51　抑制几何

Step5：在 Outline（分析树）中的 Mesh 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令，此时会弹出如图 14-52 所示的进度显示条，表示网格正在划分，当网格划分完成后，进度条自动消失，最终的网格效果如图 14-53 所示。

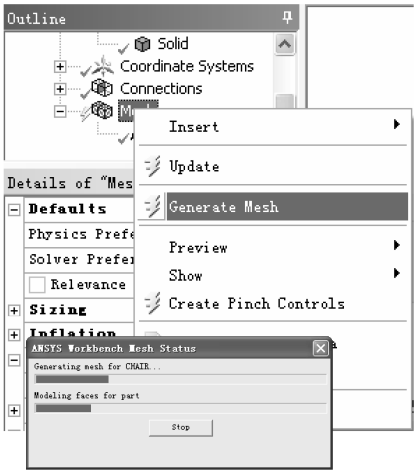


图 14-52　划分网格

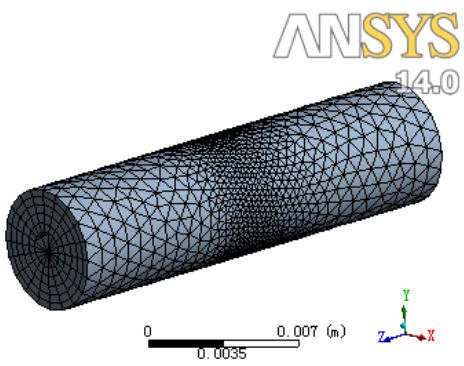


图 14-53　网格效果

Step6：单击（面选择器）按钮，然后选择热水入口，右击后在弹出的如图 14-54 所示的快捷菜单中选择 Create Named Selection 命令。

Step7：此时在弹出如图 14-55 所示的 Selection Name 对话框中的 Enter a name for the selection group 中输入 Inlet。

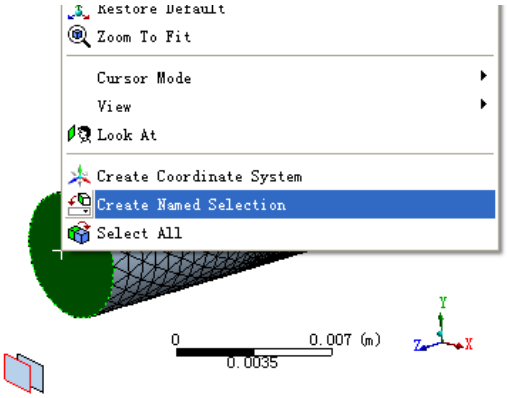


图 14-54　跨界菜单

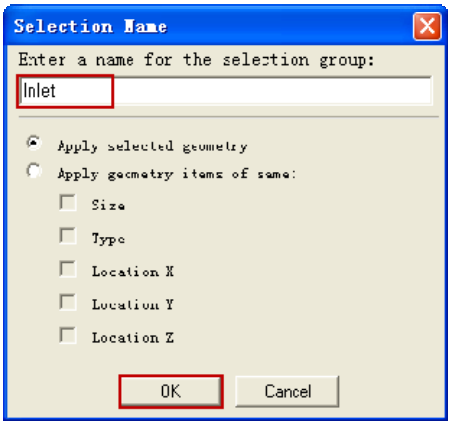


图 14-55　截面命名

Step8：同理，将另外一个个截面分别设置为 Outlet，如图 14-56 所示。

Step9：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 DesignModeler 返回 Workbench 主界面。

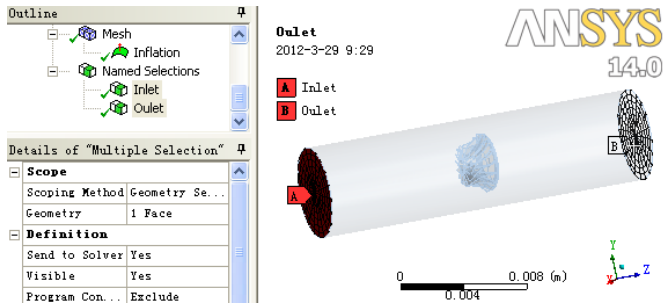


图 14-56　界面命名

7. 流体动力学前处理

Step1：返回 Workbench 主界面，右击如图 14-57 所示的 B3（Mesh）栏，在弹出来的快捷菜单中选择 Update 命令。

Step2：双击项目 B 中的 B4（Setup）栏，此时加载如图 14-58 所示的 Fluid Flow（CFX）流体力学前处理平台。

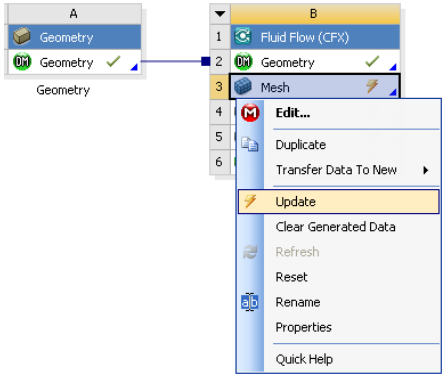


图 14-57　数据更新

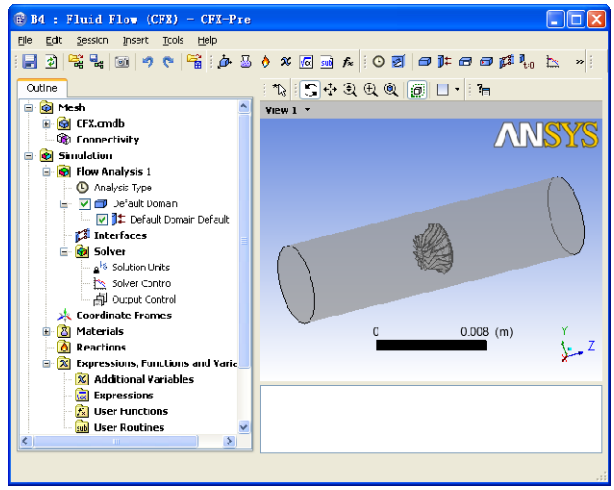


图 14-58　CFX—Pre 截面

Step3：双击如图 14-59 所示的 Default Domain 选项，此时会弹出计算域设置面板。

Step4：在如图 14-60 所示的“计算域设置”对话框中的 Basic Settings 选项卡的 Material 中选择 Water 材料。

Step5：单击工具栏中的（边界设置）按钮，在弹出来的如图 14-61 所示的 Insert Boundary 对话框中的 Name 栏中输入 Inlet，单击 OK 按钮确定。

Step6：此时弹出如图 14-62 所示的 Boundary:Inlet 对话框，在对话框中的 Basic Settings 选型卡中做如下设置。

① 在 Boundary Type 栏中选择 Inlet 选项。

② 在 Location 栏中选择 Inlet 选项。

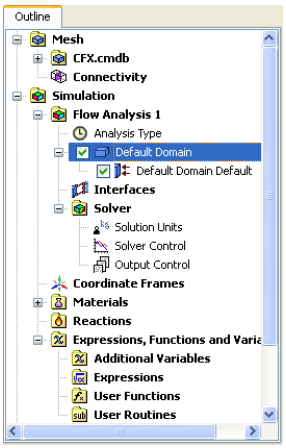


图 14-59　计算域

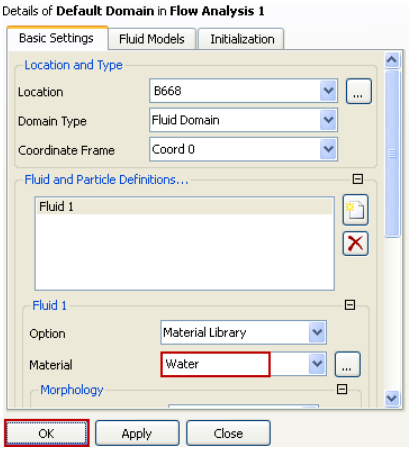


图 14-60　设置计算域

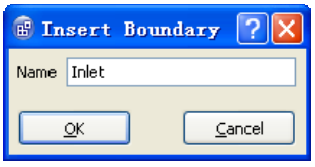


图 14-61　添加入口

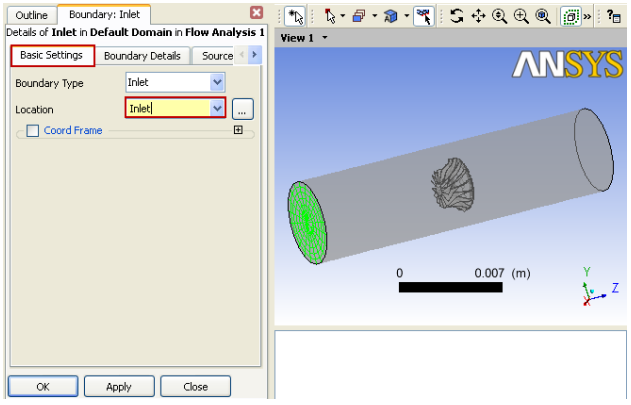


图 14-62　入口设置（一）

Step7：单击 Boundary Details 选项卡，在如图 14-63 所示的面板中做以下输入。

① Normal Speed 栏中输入 5m/s。

② 单击 OK 按钮确定。

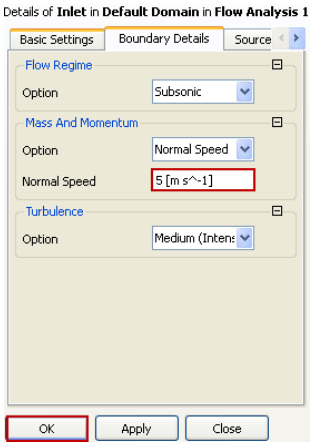


图 14-63　入口设置（二）

Step8：同样单击工具栏中的（边界设置）按钮，在弹出的对话框中输入 Onlet，单击 OK 按钮，在出现的如图 14-64 所示的 Boundary：Onlet 对话框中做如下设置。

① 在 Boundary Type 栏中选择 Onlet 选项。

② 在 Location 栏中选择 Onlet 选项。

Step9：单击如图 14-65 所示的 Boundary Details 选项卡，在选项卡中做如下设置。

① 在 Relative Pressure 栏中输入 1[atm]。

② 单击 OK 按钮确定。

Step10：同样单击工具栏中的（边界设置）按钮，在弹出的对话框中输入 Onlet，单击 OK 按钮，在出现的如图 14-66 所示的 Boundary：Wall 对话框，在对话框中做如下设置。

① 在 Boundary Type 栏中选择 Wall 选项。

② 在 Location 栏中选择叶轮所有表面。

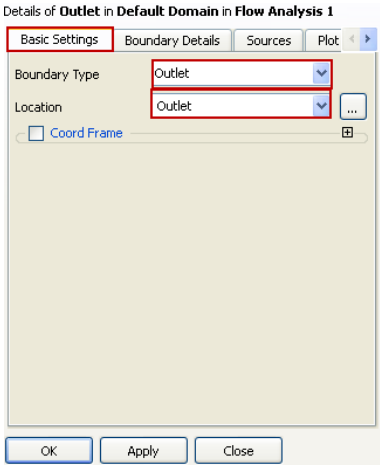


图 14-64　添加出口

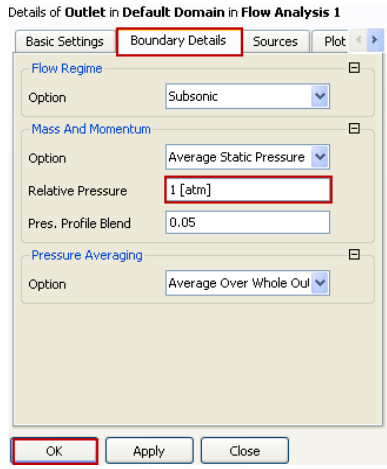


图 14-65　出口设置

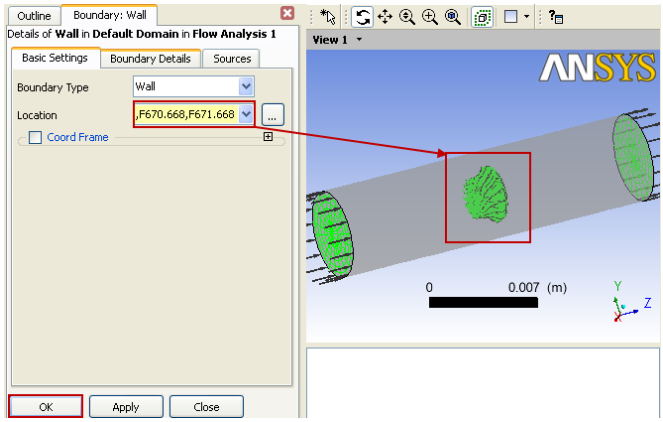


图 14-66　墙壁设置

Step11：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Fluid Flow（CFX）界面右上角的（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFX）返回 Workbench 主界面。

8. 流体计算

Step1：在 Workbench 主界面中双击项目 B 的 B5（Solution）栏，此时会弹出如图 14-67 所示的“求解器”对话框。保持其余默认，单击 Start Run 按钮，进行计算。

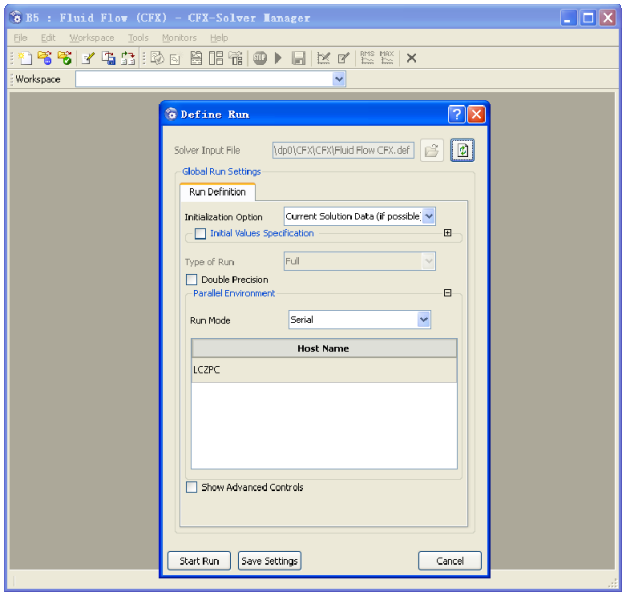


图 14-67　求解（一）

Step2：此时会出现如图 14-68 所示的“计算过程监察”对话框，对话框左侧为残差曲线，右侧为计算过程。

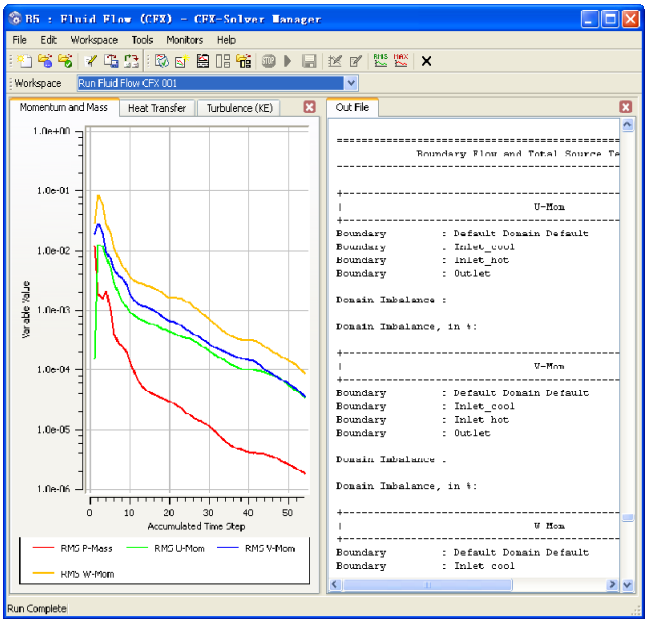


图 14-68　求解（二）

Step3：计算完成后会弹出如图 14-69 所示的对话框，单击 OK 按钮确定。

Step4：单击 Fluid Flow（CFX）界面右上角的（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFX）返回 Workbench 主界面。



图 14-69　求解完成

9. 结果后处理

Step1：返回 Workbench 主界面后，双击项目 B 中的 B6（Result）栏，此时会出现如图 14-70 所示的 CFD-Post 平台。

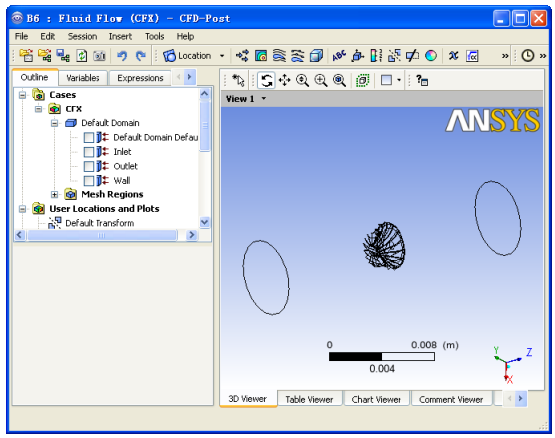


图 14-70　后处理界面

Step2：在工具栏中单击按钮，在弹出的如图 14-71 所示的对话框中保持名称默认，单击 OK 按钮。

Step3：在如图 14-72 所示的 Details of Streamline 1 面板中的 Start From 栏中选择 Inlet 选项，其余默认，单击 Apply 按钮。

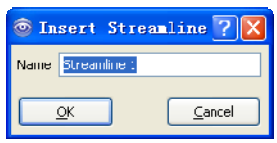


图 14-71　创建流迹线

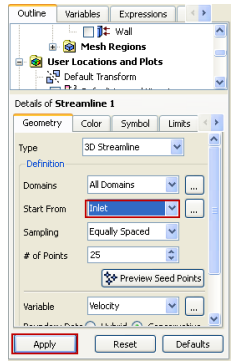


图 14-72　设置流迹线

Step4：如图 14-73 所示为外流场在叶轮位置的绕流迹线云图。

Step5：单击工具栏中的按钮，在弹出如图 14-74 所示的 Insert Contour 对话框中确定默认输入，单击 OK 按钮。

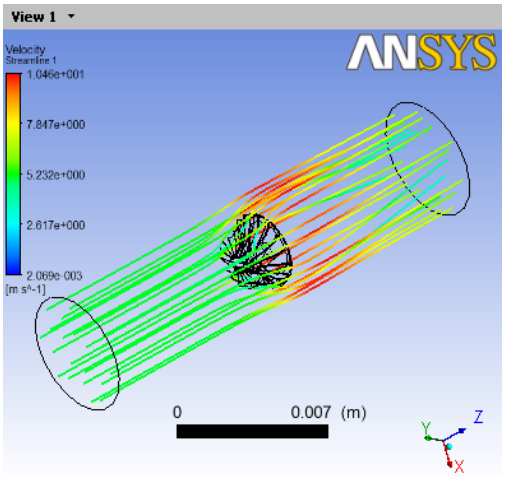


图 14-73　流迹线云图

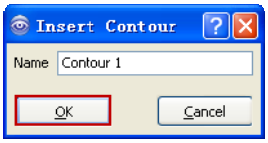


图 14-74　创建云图

Step6：如图 14-75 所示，取消 Sreamline1 前面的 √，在 Details of Contour1 面板中做如下操作。

① 在 Locations 栏中选择 Wall 选项。

② 在 Variable 栏中选择 Pressure 选项，单击 Apply 按钮。

Step7：如图 14-76 所示为流体压力分布云图。

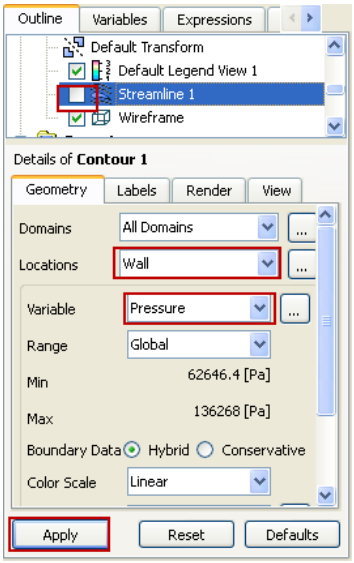


图 14-75　设置云图

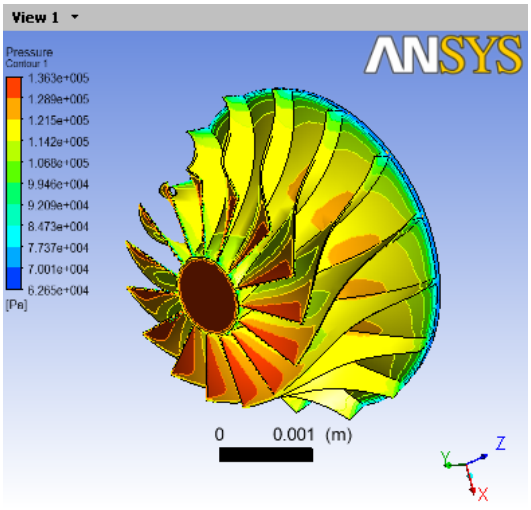


图 14-76　压力分布云图

Step8：读者也可以在工具栏中添加其他命令，这里不再讲述。

Step9：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Fluid Flow（CFD-Post）界面右上角

的（关闭）按钮，退出 Fluid Flow（CFD-Post）返回 Workbench 主界面。

10. 结构静力分析模块

Step1：如图 14-77 所示，选择 Toolbox 工具箱中的 Analysis System→Static Structural（结构静力分析）模块直接拖曳到项目 B 的 B5 中，此时会创建项目 C。

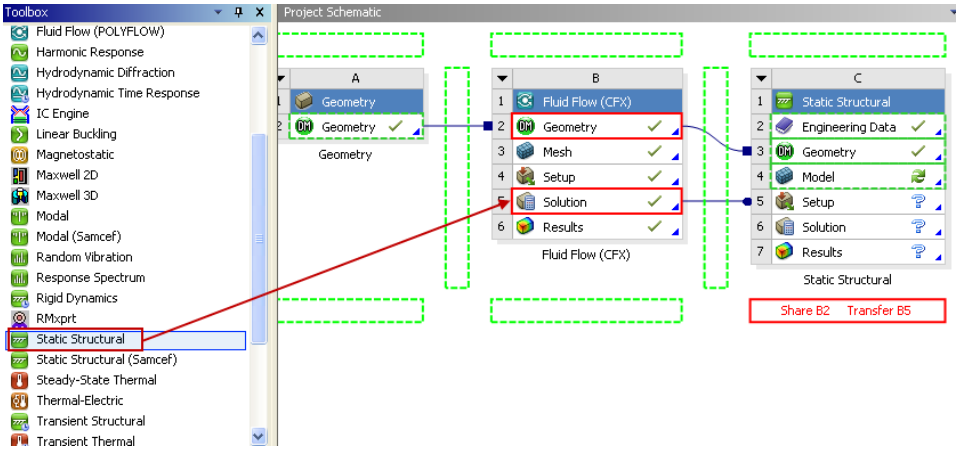


图 14-77　结构静力分析

Step2：如图 14-78 所示，右击 B2 与 C3 连接线，在弹出的快捷菜单中选择 Delete 命令，删除几何数据共享。

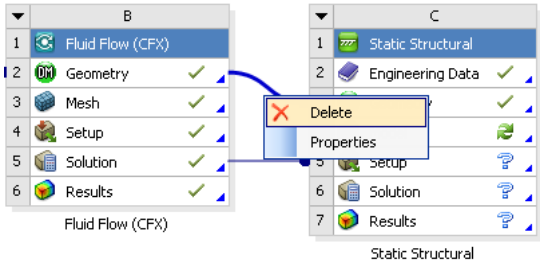


图 14-78　删除几何数据共享

Step3：如图 14-79 所示，单击 A2 不放直接拖曳到 C2 栏中，实现数据共享。

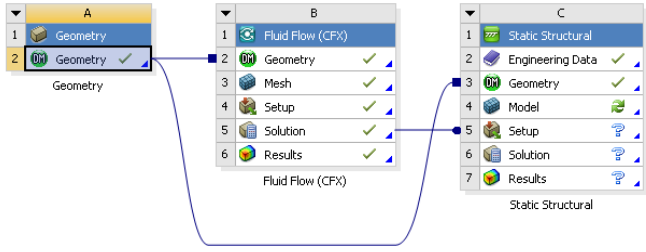


图 14-79　几何数据共享

Step4：双击项目 C 中的 C3（Model）选项，此时加载如图 14-80 所示的 Mechanical 平台。

Step5：右击 Solid 选项，在弹出的如图 14-81 所示的快捷菜单中选择 Suppress Body 命令。

Step6：右击 Mesh 选项，在弹出的如图 14-82 所示的快捷菜单中选择 General Mesh 命令。

Step7：划分完的网格如图 14-83 所示。

注：此处网格划分比较粗，仅仅为了讲解过程。

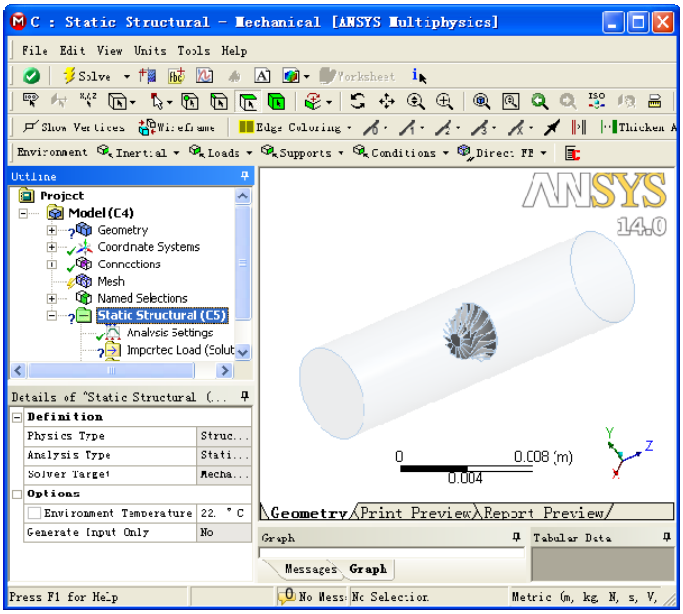


图 14-80　Mechanical 界面

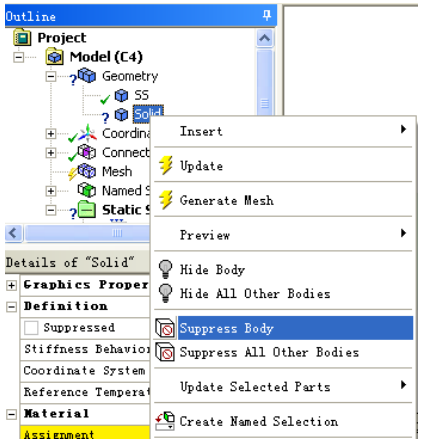


图 14-81　几何抑制

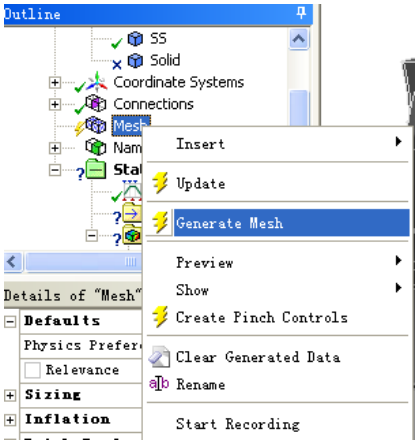


图 14-82　网格划分

Step8：右击 Static Structural→ImportLoad 命令，在弹出如图 14-84 所示的快捷菜单中依次选择 Insert→Pressure 命令。

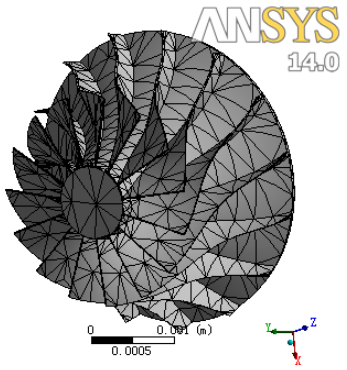


图 14-83　网格划分

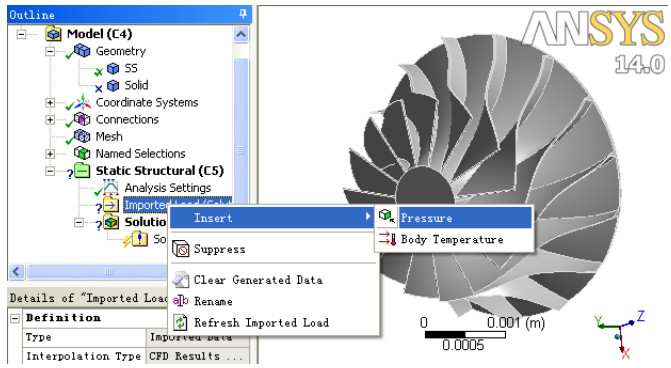


图 14-84　添加载荷

Step9：在如图 14-85 所示 Details of “Imported Pressure”面板中做如下设置。

① 在 Geometry 栏中确定叶轮叶片侧的 65 个曲面被选中。

② 在 CFD Surface 栏中选择 Wall 选项。

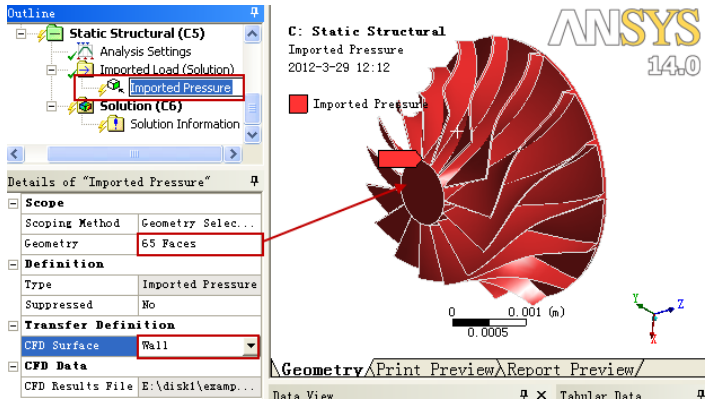


图 14-85　选择面

Step10：如图 14-86 所示，右击 Imported Pressure 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Import Load 命令。

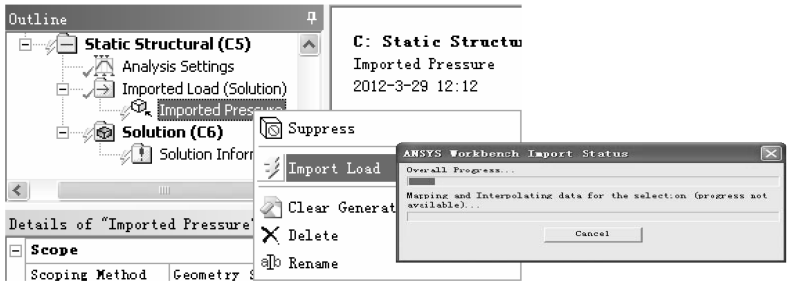


图 14-86　导入压力

Step11：如图 14-87 所示为导入成功的流体压力载荷。

Step12：如图 14-88 所示，选择 Static Structural（C5）选项，在工具栏中出现了 Environment 工具栏。

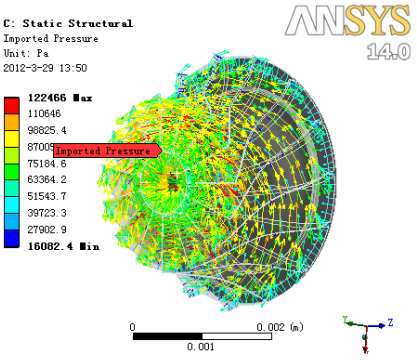


图 14-87　压力载荷分布

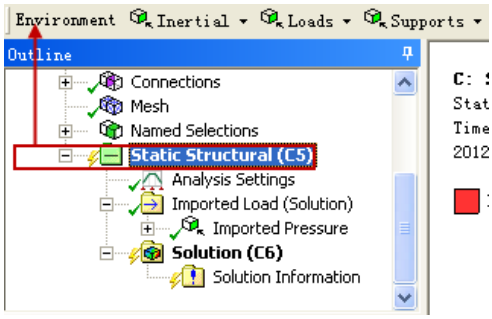


图 14-88　工具栏

Step13：如图 14-89 所示，选择叶轮的中心轮毂圆面，在 Details of “Fixed Support” 面板中的 Geometry 栏上显示 1Face，表明叶轮的中心轮毂圆面被选中。

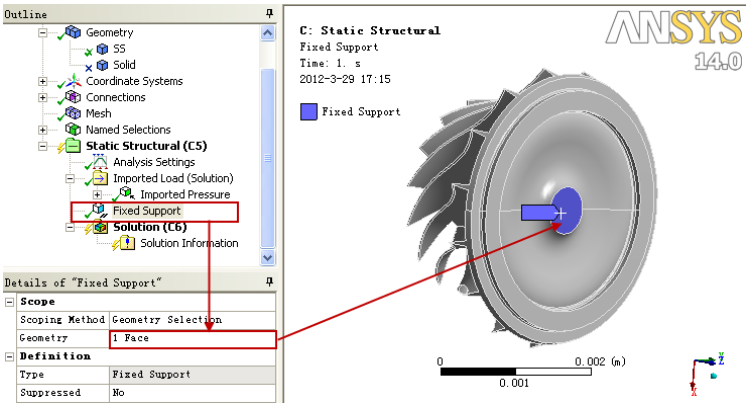


图 14-89　固定约束

Step14：如图 14-90 所示，右击 Static Structural（C5）选项，在弹出的快捷菜单中选择 Solve 命令，进行计算。

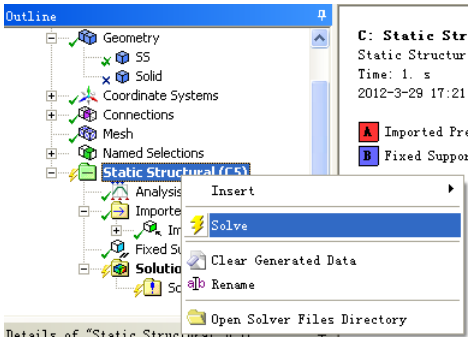


图 14-90　求解

Step15：图 14-91 所示为流体作用在叶轮上使得叶轮叶片变形的总变形云图。

Step16：图 14-92 所示为叶轮应力分布云图。

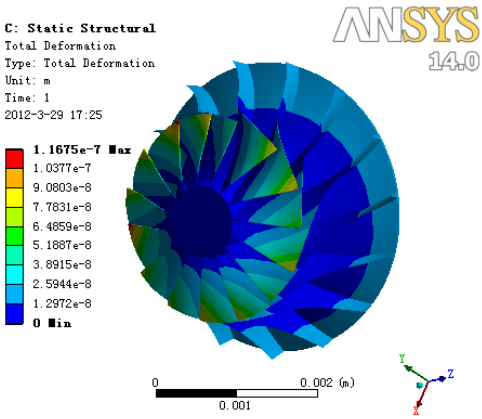


图 14-91　位移响应云图

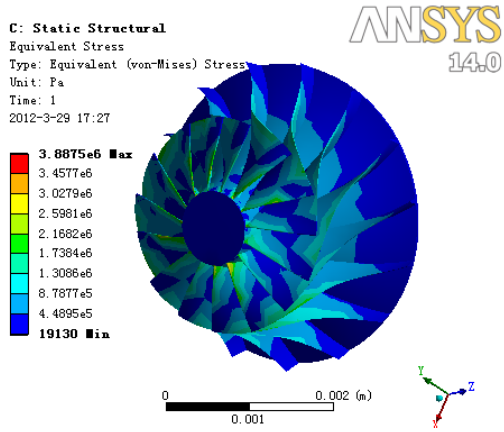


图 14-92　应力分布云图

Step17：单击工具栏中的（保存）按钮，单击 Mechanical 界面右上角的（关闭）按钮，退出 Mechanical 返回 Workbench 主界面。

14.4 本章小结

本章介绍了 ANSYS CFX 模块的流体动力学分析功能，通过一个内流场和一个外流场两个典型算例的详细操作步骤，讲解了软件的前处理、网格剖分、求解计算及后处理等操作方法，以及流固耦合分析的处理方法。

通过本章节的学习，读者应该对流体动力学及其耦合分析的过程有详细的了解。

第 15 章

Workbench 耦合场分析及实例详解

本章主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 与 Ansoft Maxwell 15.0 的单向耦合分析功能。讲解通过 Ansoft Maxwell 软件计算通有电流的四分裂导线的磁场，磁场与电流相互作用产生磁场力，然后将磁场力结果映射到 Workbench 的模型中，进行静力分析。

学习目标：

（1）熟练掌握 Ansoft Maxwell 静态磁场分析的方法及过程。

（2）熟练掌握 ANSYS Workbench 静力学分析的方法及过程。

（3）掌握两个软件静态磁场结构单向耦合分析方法及过程。

15.1 多物理场耦合分析简介

多物理场耦合分析是考虑两个或两个以上工程学科（物理场）间相互作用的分析。例如，流体与机构的耦合分析（流固耦合）、电磁与结构耦合分析、电磁与热耦合分析、热与结构耦合分析、电磁与流体耦合分析、流体与声学耦合分析、结构与声学耦合分析（振动声学）等。

以流固耦合为例，流体流动的压力作用到结构上，结构产生变形，而结构的变形又影响了流体的流道，因此是相互作用的问题。

再如通有电流的螺线管会在其周围产生磁场，同时流有电流的螺线管在磁场中会受到磁场力的作用而产生形变，形变会使得螺线管的磁场分布发生变化，因此是相互作用的问题。

耦合分析总体来说分为两种，即单向耦合与双向耦合。

- 单向耦合：以流固耦合分析为例，如果结构在流道中受到流体压力产生的变形很小，忽略掉亦可满足工程计算的需要，则不需要将变形反馈给流体，这样的耦合称为单向耦合。
- 双向耦合：以流固耦合分析为例，如果结构在流道中受到的流体的压力很大，或者即使压力很小也不能被忽略掉，则需要将结构变形反馈给流体，这样的耦合称为双向耦合。

ANSYS Workbench 14.0 新版本的仿真平台具有多物理场的双向耦合分析的能力，其中包括以下几种。

- 流体—结构耦合（CFX 与 Mechanical 或 FLUENT 与 Mechanical）。

- 流体—热耦合（CFX 与 Mechanical 或 FLUENT 与 Mechanical）。
- 流体—电磁耦合（FLUENT 与 ANSOFT Maxwell）。
- 热—结构耦合（Mechanical）。
- 静电—结构耦合（Mechanical）。
- 电磁—热耦合（ANSOFT Maxwell 与 Mechanical）。
- 电磁—机构—噪声（ANSOFT Maxwell 与 Mechanical 与 ACTRAN）。

以上耦合为场耦合分析方法，其中部分分析能实现双向耦合计算。

除此之外，自从 ANSYS13 版本以来，ANSYS Workbench 软件还可与 ANSOFT Simplorer 软件集成在一起实现场路耦合计算。

场路耦合计算适合于进行电机、电力电子装置及系统、交直流传动、电源、电力系统、汽车部件、汽车电子与系统、航空航天、船舶装置与控制系统、军事装备仿真。

15.2 项目案例 1——四分裂导线电磁结构耦合分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的电磁场分析模块 Maxwell 的建模方法及求解过程，计算计算四分裂导线在大电流作用下的受力情况。

学习目标：熟练掌握 Maxwell 的建模方法及求解过程，同时掌握电磁结构耦合分析方法。

模型文件	光盘\model\wire.x_t
结果文件	光盘\example\magnetostructure.wbpj

1. 问题描述

图 15-1 所示为一个四分裂导线模型，单根导线直径为Φ 70mm，导线长为 10m，每两根导线间距离为 600mm，每根导线都通有 42.5kA 的大电流（如图 15-1 中箭头方向所示），当四分裂导线两端用间隔棒固定后，试分析其变形情况及应力分布情况，为了简化分析，此处直接将两端设置成固定约束。

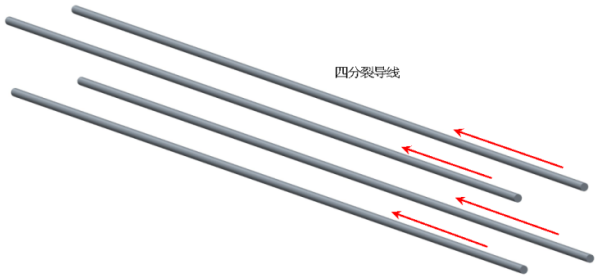


图 15-1　四分裂导线模型

2. 软件启动与保存

Step1：启动 Workbench。如图 15-2 所示，在 Windows XP 下选择“开始”→“所有

程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，即可进入如图 15-3 所示的主界面，主界面中包含了 Getting Started 窗口。



图 15-2　Workbench 启动方法

Step2：保存工程文档。进入 Workbench 后，单击工具栏中的Save As...按钮，将文件保存为 01，如图 15-3 所示，单击 Getting Started 窗口右上角的（关闭）按钮将其关闭。

注 意

本节算例需要用到 ANSOFT Maxwell15.0 软件，请读者进行安装；

由于 ANSOFT Maxwell 软件不支持保存路径中存在中文名，故在进行文档保存时，保存的路径不能含有中文字符，否则会发生错误。

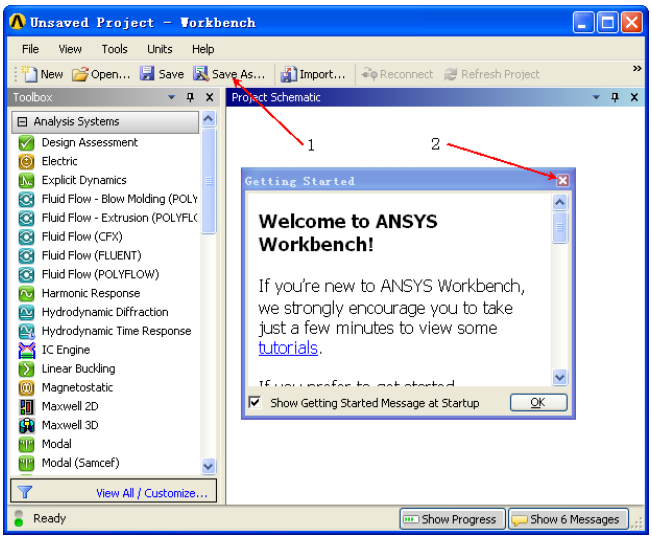


图 15-3　保存工程文档

3. 建立电磁分析与数据读取

Step1：创建电磁场分析。在 Workbench 左侧 Toolbox（工具箱）的 Analysis Systems 中选择 Maxwell 3D 选项并按住左键不放将其拖到右侧的 Project Schematic 窗口中，此时即可创建一个如同 EXCEL 表格的工程分析流程表 A，如图 15-4 所示。

提 示

工程分析流程表 A 的 A1～A4 是 Maxwell 3D 软件前处理、计算及后处理的三个过程。

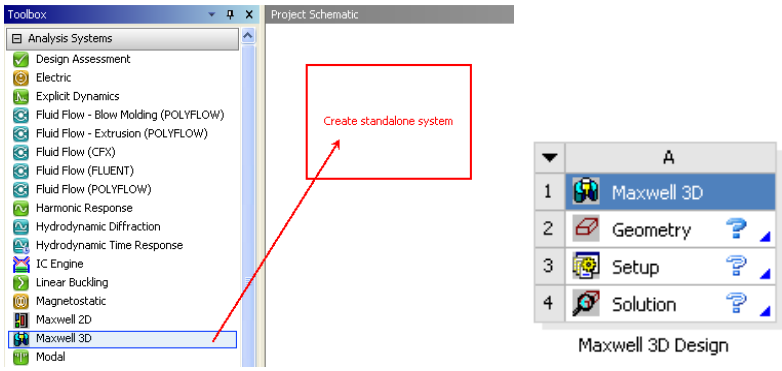


图 15-4　创建电磁分析环境

Step2：打开 Maxwell 3D 软件。在表 A2（Geometry）中右击会弹出如图 15-5 所示的快捷菜单，在快捷菜单中选择 Edit…命令启动 Maxwell 3D 软件，如图 15-6 所示。

提 示

在工程分析流程表 A 中直接双击 A2(Geometry)栏也可启动 Maxwell 3D 软件。

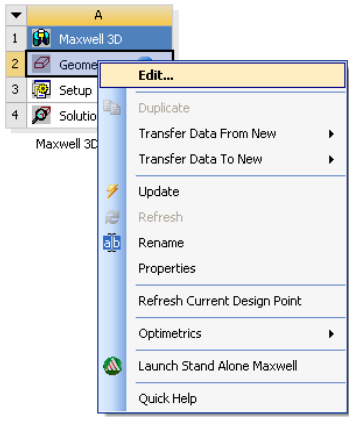


图 15-5　启动 Maxwell

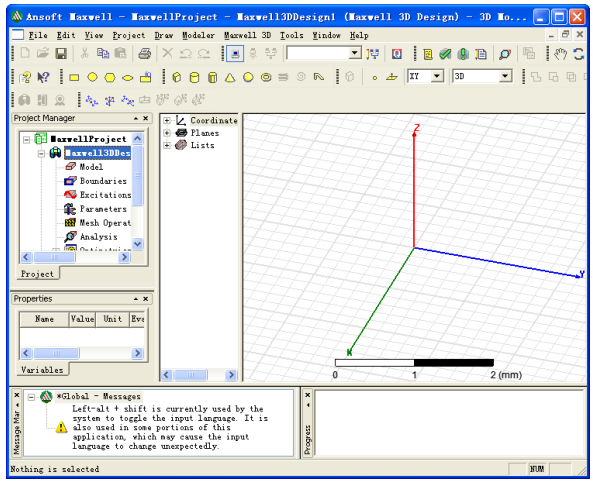


图 15-6　Maxwell 界面

Step3：读入模型数据文件。如图 15-7 所示，选择菜单栏中的 Modeler→Import...命令，会弹出如图 15-8 所示的“Import File”对话框，在对话框中选择 wire.x_t 文件，单击“打开”按钮，即可打开模型文件。

提 示

读取的模型数据已经被设置成 mm，这里就不需要对软件进行单位设定。

注 意

如果模型简单，可以直接在 Maxwell 软件中创建图形，本例子的模型用 Pro/E 创建并保存为通用格式 x_t。

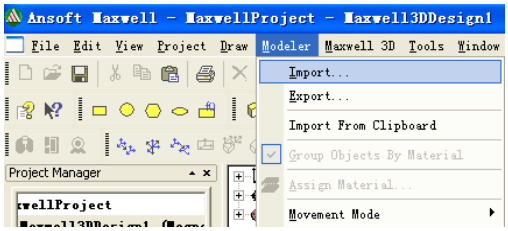


图 15-7　读入模型数据文件

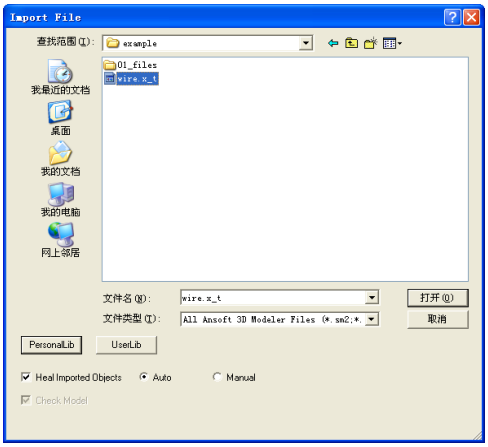


图 15-8　“Import File”对话框

Step4：模型数据分析。模型读取完成后，会弹出如图 15-9 所示的 Model Analysis 对话框，在该对话框左侧的表格中显示的全为 Good，说明数据没有问题。单击 Close 按钮确定模型文件的读取。

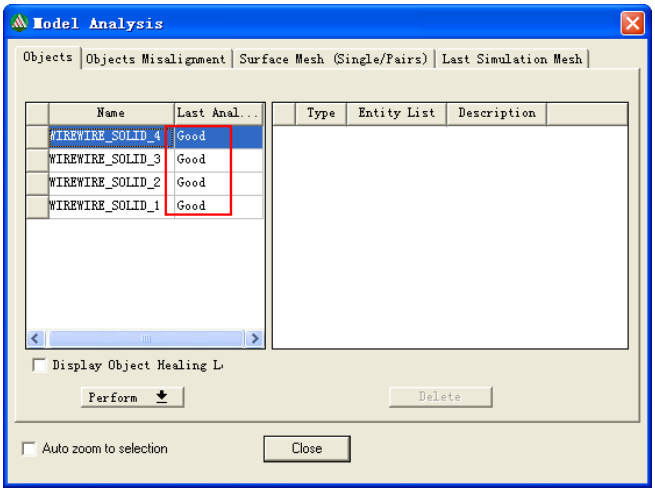


图 15-9　读取的模型

提 示

如果在 Model Analysis 对话框左侧的表格中不显示或不全部显示 Good，说明读入的数据模型中存在问题，请检查建模时是存在错误操作。

4. 求解器与求解域的设置

Step1：设置求解器类型。如图 15-10 所示，选择菜单栏中的 Maxwell 3D→Solution Type…命令，在弹出如图 15-11 所示的“Solution Type”对话框中选择 Magnetostatic（静态磁场分析）选项，单击 OK 按钮关闭“Solution Type”对话框。

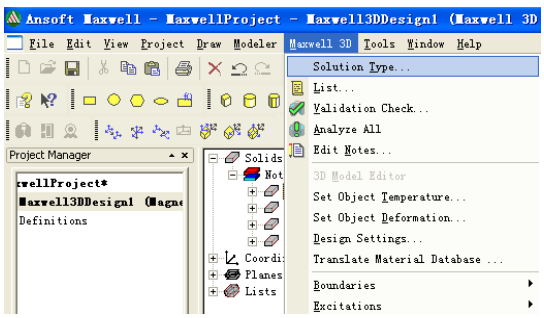


图 15-10　设置求解器类型

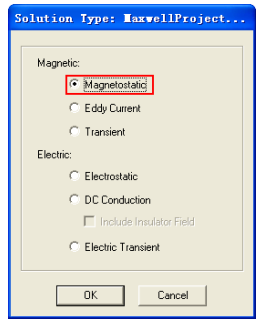


图 15-11　“Solution Type”对话框

提 示

单击绘图工具栏中的按钮，也可创建模型求解域。

Step2：如图 15-12 所示，在 Region 对话框中的 Pad individual directions 栏中输入表 15-1 中的相关数据。

表 15-1　参数设置值

+X	Percentage Offset	500
-X	Percentage Offset	500
+Y	Percentage Offset	0
-Y	Percentage Offset	0
+Z	Percentage Offset	500
-Z	Percentage Offset	500

Step3：图 15-13 所示为设置完成的求解域模型。

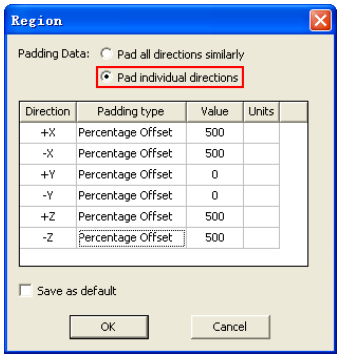


图 15-12　输入求解域大小

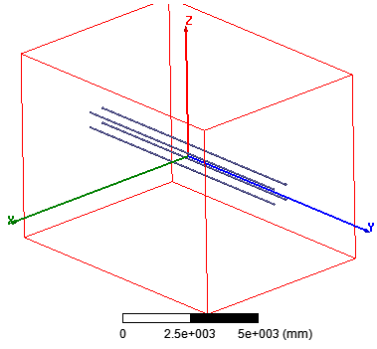


图 15-13　建立求解区域

5. 赋予材料属性

Step1：赋予材料属性。在模型树中选择相应模型名，右击后在弹出的快捷菜单中选择 Assign Material…命令，如图 15-14 所示，此时会弹出如图 15-15 所示的“Select Definition”对话框。



当需要选择多个连续模型名时，可以先选中第一个，然后按住 Shift 键，同时选择最后一个。当需要选择多个不连续的模型名时，按住 Ctrl 键同时选择需要选中的模型名即可。

Step2：在 Select Definition 对话框中选择 Aluminum 材料并单击“确定”按钮，此时模型树中四个导线的上级菜单由 Not Assigned 变成 Aluminum，求解域默认为真空 Vacuum。

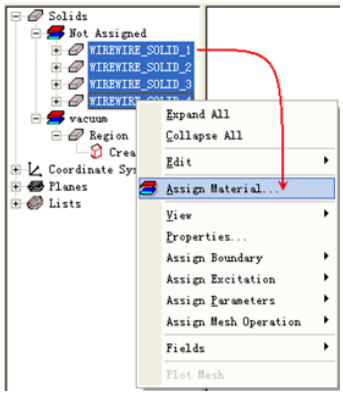


图 15-14　赋予材料属性

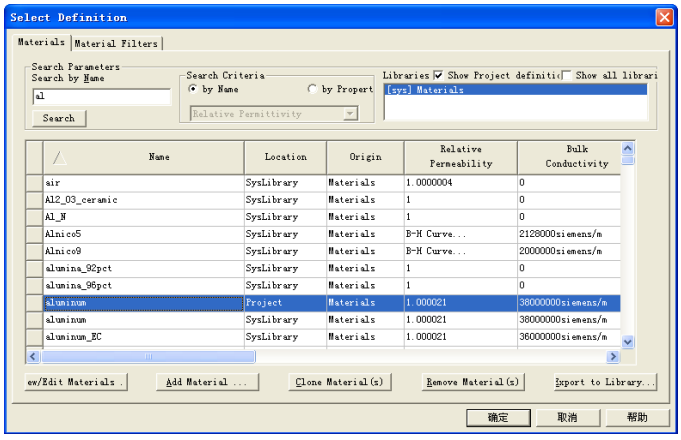


图 15-15　“Select Definition”对话框

6. 添加激励

Step1：创建激励。单击键盘 f 键，然后单击如图 15-16 所示四根导线的四个端面，右击后在弹出的快捷菜单中选择 Assigned Excitation→Current…命令，此时会弹出如图 15-17 所示“Current Excitation”对话框，在该对话框的 Value 中输入 42.5，并将单位设置成 kA，单击 OK 按钮，完成参数的设置。

Step2：同样，将四根导线的另外一个端面也设置为 42.5kA 的电流，与上面操作步骤不同之处为此处的电流方向设置为自里向外的，如图 15-18 所示，此时只需单击 Swap Direction 按钮即可完成相应的操作。

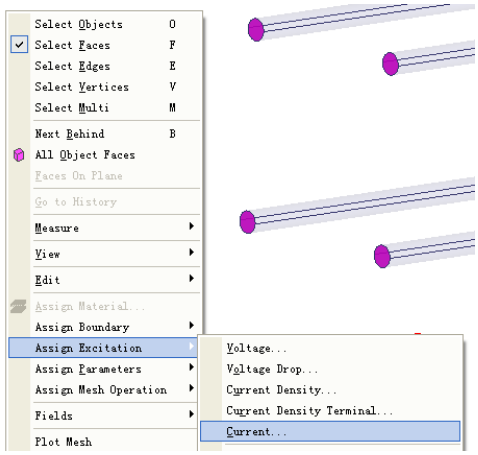


图 15-16　创建激励

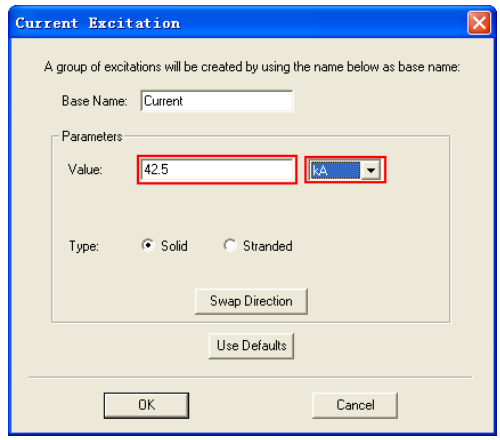


图 15-17　“Current Excitation”对话框

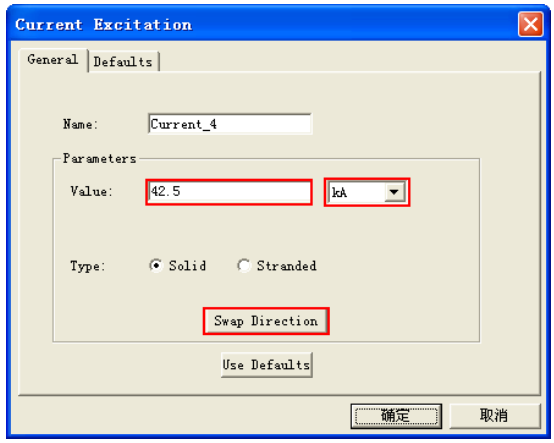


图 15-18　设置激励

7. 网格划分与分析步创建

Step1：剖分网格并调整网格大小。这里采用自行设置网格大小剖分网格，选中四根导线，右击后在弹出的快捷菜单中选择如图 15-19 所示的 Assign Mesh Operation→Inside Selection→Length Based…命令，此时会弹出 Element Length Based Refinement 对话框。

Step2：在弹出对话框的 Maximum Length of Elements 中输入 500，单位选择 mm，如图 15-20 所示。单击 OK 按钮完成相关参数的设置。

Step3：采用同样的方法设置如图 15-21 所示求解域网格剖分大小。

Step4：添加一个分析步。在 Project Manager 中的 Analysis 选项右击，在弹出的快捷菜单中选择如图 15-22 所示的 Add Solution Setup…命令，此时会弹出如图 15-23 所示的“Solve Setup”对话框，里面的参数全部采用默认设置，单击“确定”按钮，此时在 Analysis 下会出现一个 Setup1 选项。

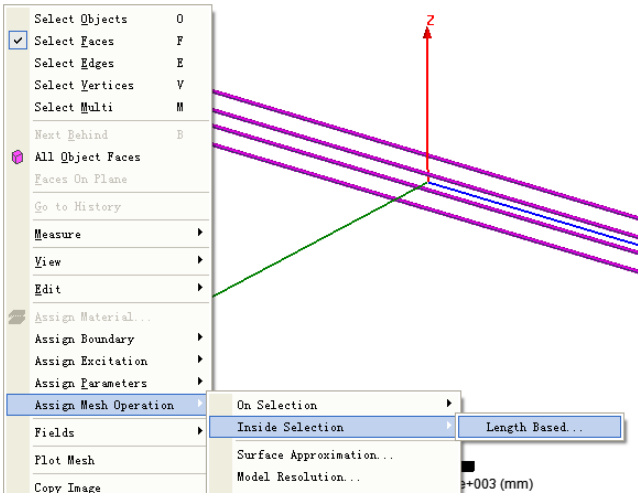


图 15-19　网格设置命令

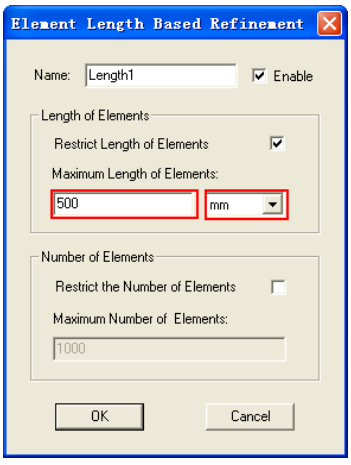


图 15-20　网格尺寸设置

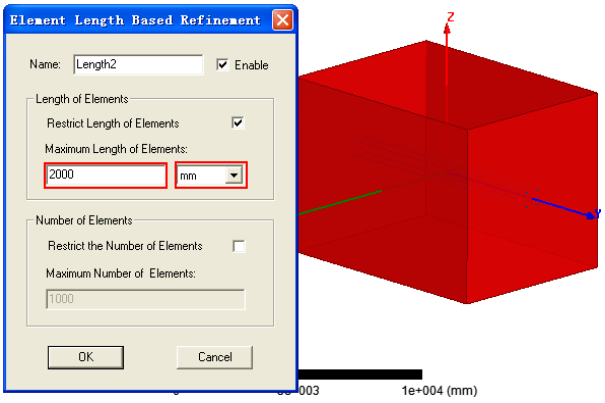


图 15-21　求解域网格尺寸设置

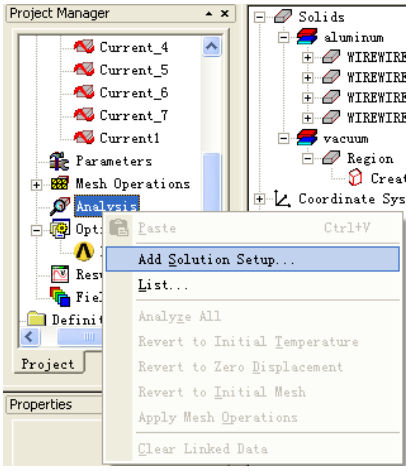


图 15-22　添加一个分析步

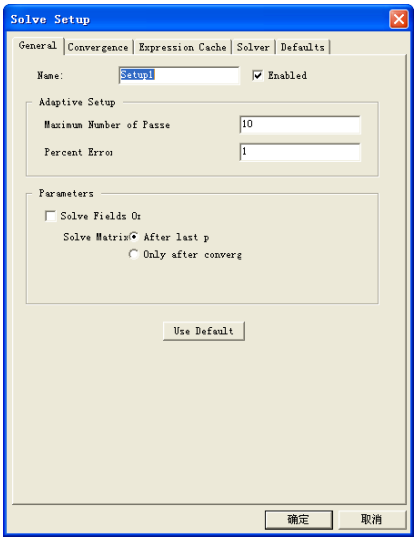


图 15-23　“Solve Setup”对话框

Step5：划分网格。在 Project Manager 中的 Analysis→Setup1 命令右击，在弹出如图 15-24 所示的快捷菜单中选择 Apply Mesh Operation 命令，执行网格划分操作，划分完成的网格如图 15-25 和图 15-26 所示。

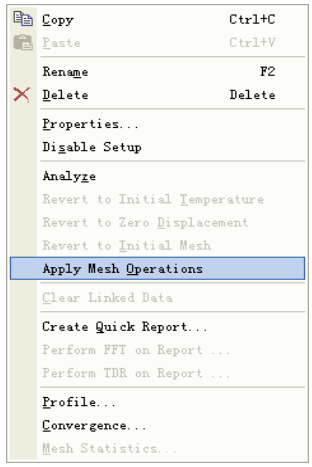


图 15-24　执行网格剖分

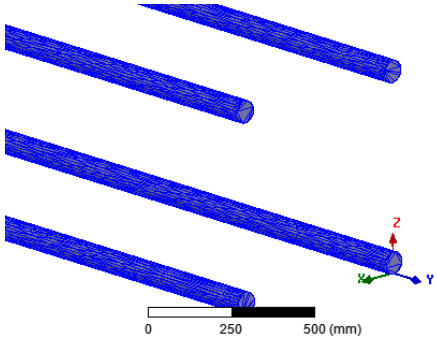


图 15-25　四分裂导线网格

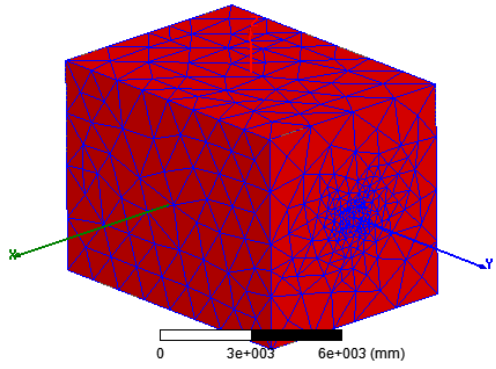


图 15-26　求解域网格

8. 模型检查与计算

通过上面的操作步骤，有限元分析的前处理工作全部结束，为了保证求解能顺利完成计算，需要先检查一下前处理的所有操作是否正确。

Step1：模型检查。单击工具栏上的按钮出现如图 15-27 所示的 Validation Check 对话框，对号说明前面的基本操作步骤没有问题。

注 意

如果出现了，说明前处理过程中某些步骤有问题，请根据右侧的提示信息进行检查。

Step2：求解计算。右击 Project Manager 中的 Analysis→Setup1 命令，在弹出的快捷菜单中选择如图 15-28 所示的 Analyze 命令，进行求解计算，求解需要一定的时间。

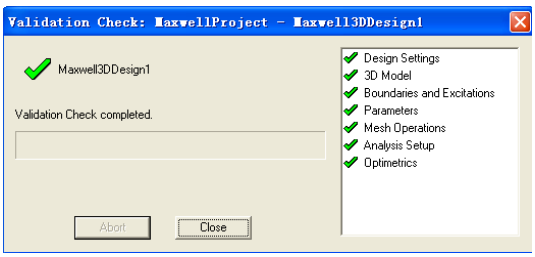


图 15-27　模型检查

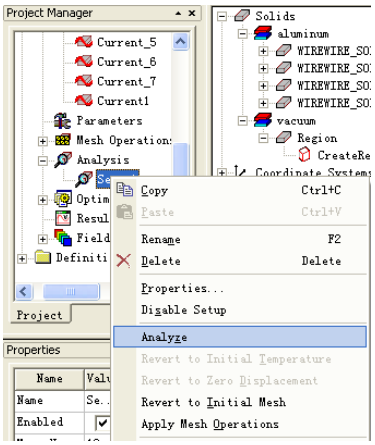


图 15-28　求解模型

9. 后处理

Step1：后处理操作。求解完成后，选中四根导线模型，右击后在弹出如图 15-29 所示的快捷菜单中选择 Field→Other→Volme_Force_Density 命令，此时弹出如图 15-30 所示的“Create Field Plot”对话框。

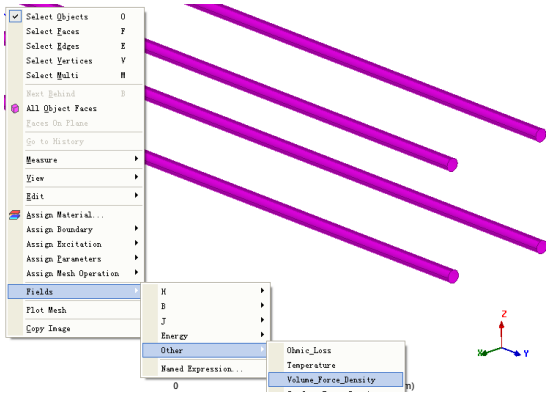


图 15-29　后处理操作

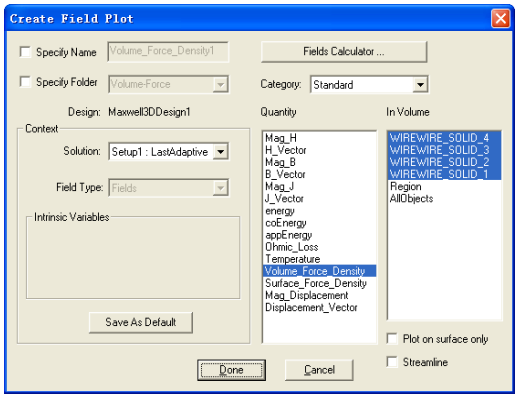


图 15-30　“Create Field Plot”对话框

Step2：在 Create Field Plot 对话框中的 Quantity 中选择 Volme_Force_Density 选项，在 In Volume 中选择四根导线实体。体积力密度云图如图 15-31 所示。

Step3：单击按钮，保存文档，然后单击按钮关闭 Maxwell 3D 软件，返回到 Workbench 主窗口。

10. 创建力学分析和数据共享

Step1：回到 Workbench 窗口中，在如图 15-32 所示的表格 A4（Solution）上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Transfer Data To New→Static Structural 命令，此时会在 A 表的右侧出现一个 B 表，同时出现 A4 与 B5 连接曲线，这说明 A4 的结果数据可以作为 B5 的外载荷使用。

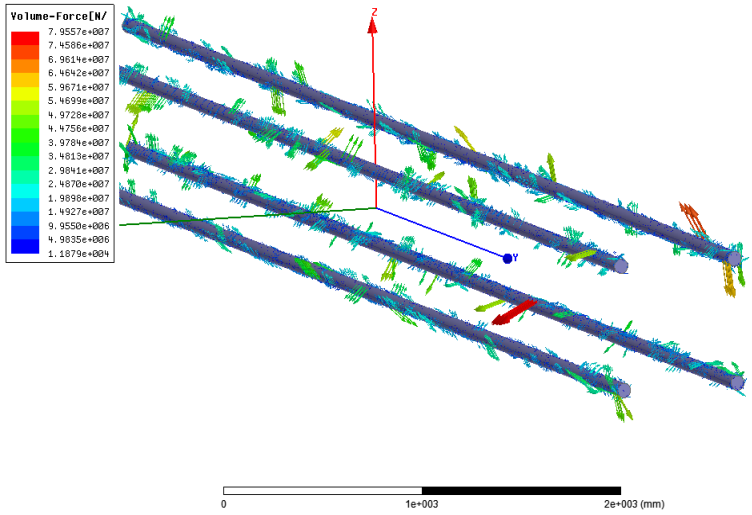


图 15-31　体积力密度云图

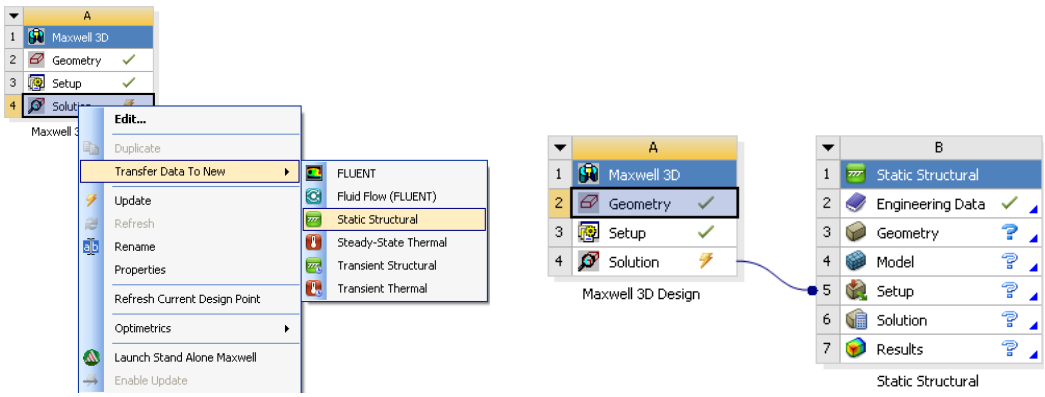


图 15-32　创建耦合的静力分析模型

Step2：共享几何模型数据。选择如图 15-33 所示的 A2（Geometry）选项不放拖曳到 B3（Geometry）中。

Step3：在 B3（Geometry）上右击，在弹出的快捷菜单中选择Refresh 命令，当数据被成功读入后，会在 B3 表格后面出现✓。

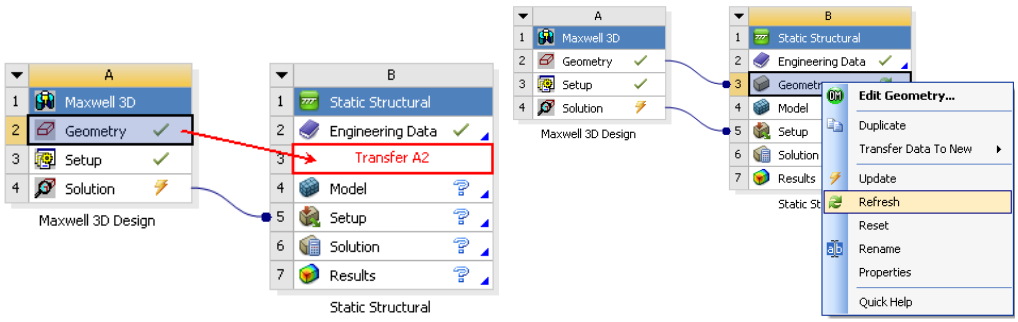


图 15-33　共享几何模型数据

Step4：启动 DesignModeler。在 B3（Geometry）中右击，在弹出如图 15-34 所示的快捷菜单中选择 Edit Geometry…命令。

在如图 15-35 所示的 DesignModeler 操作界面里，可以对模型进行修改等一些操作，在弹出的“单位设置”对话框中选择 Millimeter 选项，单击 OK 按钮。

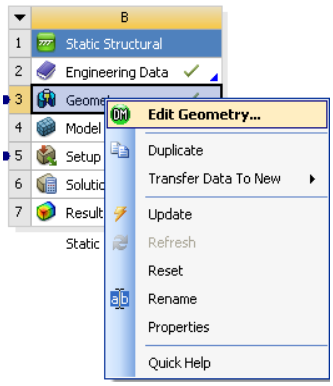


图 15-34　编辑几何命令

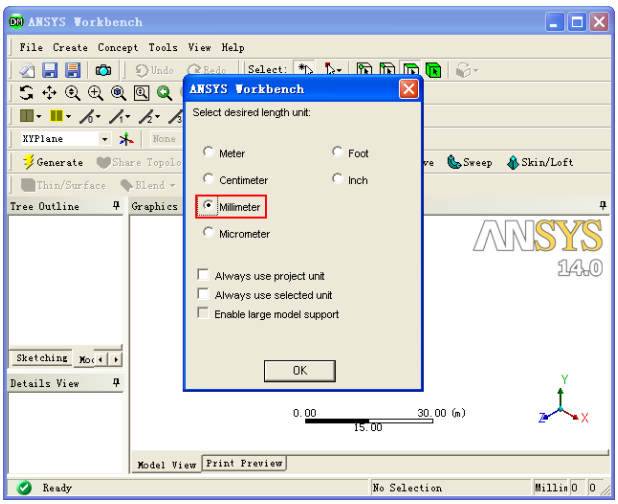


图 15-35　启动 DesignModeler

Step5：共享数据模型导入。在左侧的模型树 Tree Outline 中 Import1 上右击，在弹出如图 15-36 所示的快捷菜单中选择 Generate 命令，四分裂导线模型被显示到 DesignModeler 绘图区域中，如图 15-37 所示，单击“保存”按钮并关闭 DesignModeler，回到 Workbench 主窗口。

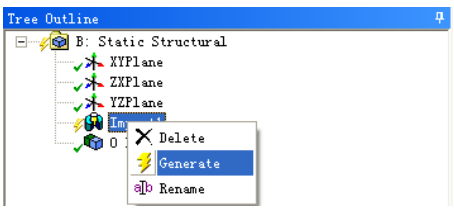


图 15-36　生成模型数据

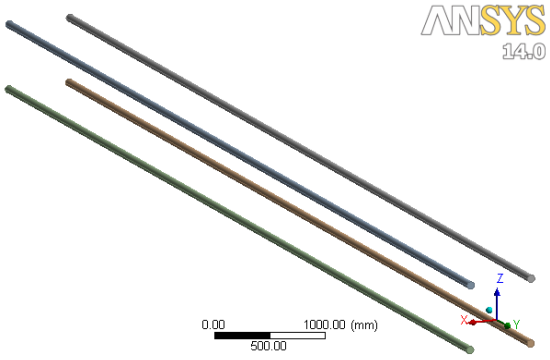


图 15-37　四分裂模型

Step6：体积力密度数据传递。在 Workbench 主窗口 A4（Solution）中右击，在弹出的快捷菜单中选择 Update 命令，经过数分钟的计算，A4（Solution）表格由⚡变成✓，如图 15-38 所示，说明 A4 数据已经成功传递给 B5。

11. 材料设定

Step1：材料属性设定。在 B2（Engineering Data）中右击，在弹出的快捷菜单中选择 Edit…命令，单击如图 15-39 所示工具栏上的按钮。

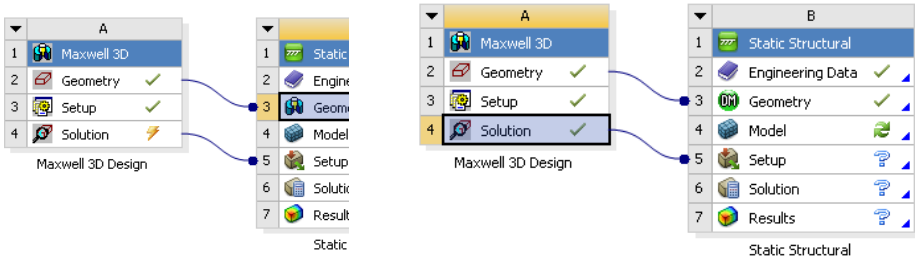


图 15-38　数据传递

Step2：进入如图 15-40 所示材料库，选择 General Materials→Aluminum Alloy 命令，设定完成后单击 Return to Project 按钮切换到工程界面下。

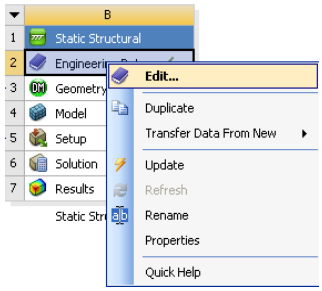


图 15-39　材料属性设定

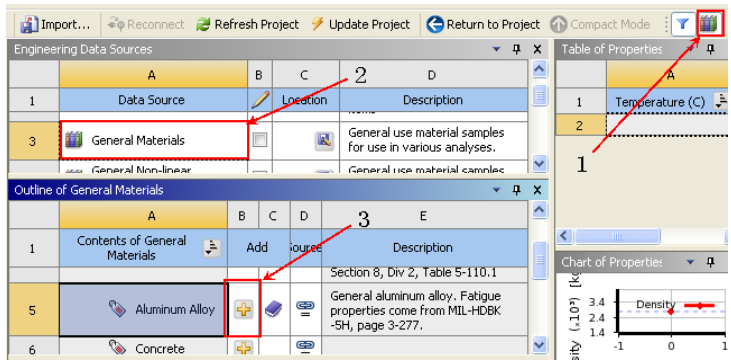


图 15-40　材料选择

Step3：Mechanical 中的模型。在 B4（Model）中右击，在弹出如图 15-41 所示的快捷菜单中选择 Edit…命令，进入如图 15-42 所示的 Mechanical 操作界面。

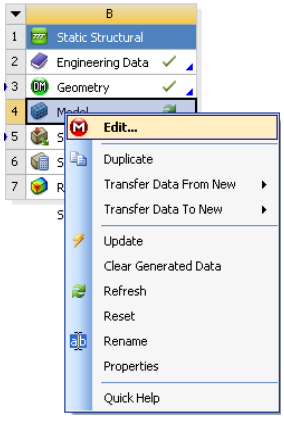


图 15-41　编辑 Mechanical

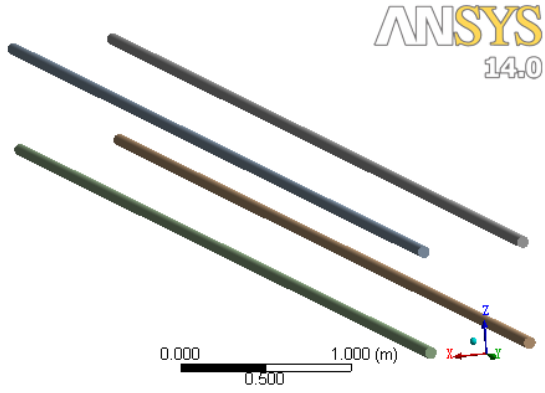


图 15-42　Mechanical 中模型

Step4：赋予材料属性。选择如图 15-43 所示 Outline 中 Model（B4）→Geometry 里面的四个模型，在下面的 Details of “Multiple Selection”中的 Material→Assignment 中选择 Aluminum Alloy 选项。

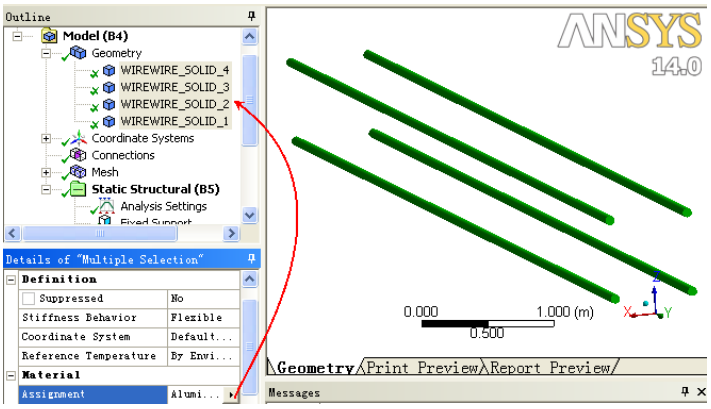


图 15-43　赋予材料属性

12. 网格划分

Step1：网格设置。在 Project→Model（B4）→Mesh 命令上右击，在弹出如图 15-44 所示的快捷菜单中选择 Insert→Method 命令。



图 15-44　插入网格划分方式

Step2：如图 15-45 所示，选中里面的四个模型，选择 Details of “ Sweep Method”中的 Method→Sweep 选项，在 Free Face Mesh Type 中选择 All Quard 选项，在 Type 中选择 Element Size 选项，在 Sweep Element Size 中输入 2.e-002m。

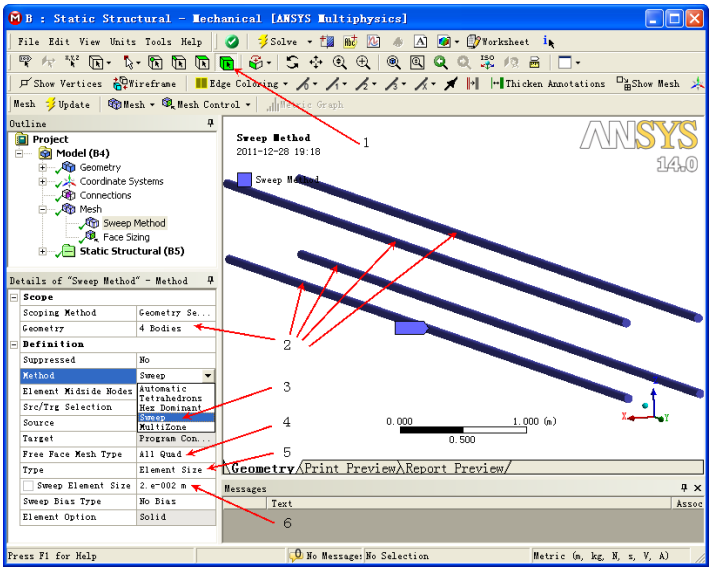


图 15-45　网格扫描剖分设置

Step3：用同样方式添加一个如图 15-46 所示的 Sizing，确定在 Geometry 栏中选中了四分裂导线的四个端面，在 Details of “Face Sizing”的 Type 中选择 Element Size 选项，在 Element Size 中输入 2.e-002m，执行网格计算，如图 15-47 所示，结果如图 15-48 所示。

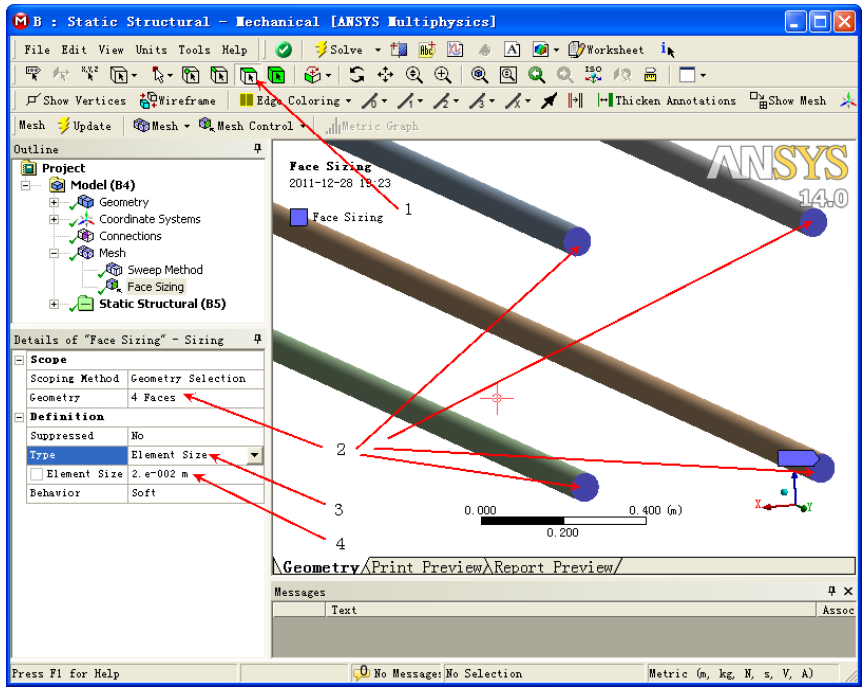


图 15-46　模型端面网格设置

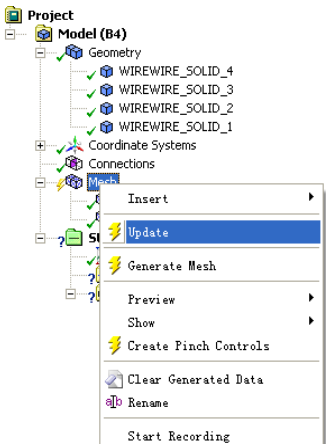


图 15-47　执行网格计算

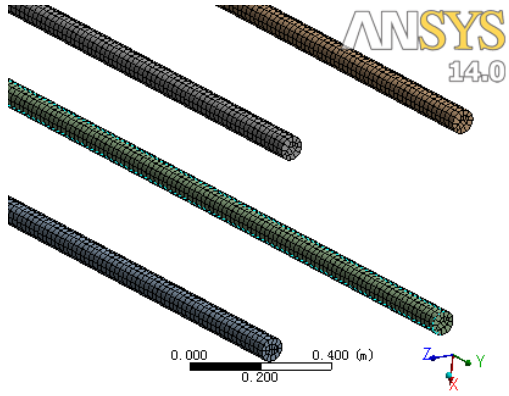


图 15-48　网格生成

13. 添加边界条件与映射激励

Step1：添加边界条件。选中如图 15-49 所示四根导线的四个端面并右击 Insert→Fixed Support 命令，同样在另一端也添加同样的边界条件，请读者自己完成。

Step2：映射力密度到结构网格上。右击 Static Structural（B5）选项弹出快捷菜单，

在如图 15-50 所示的快捷菜单中选择 Insert→Body Force Density 命令。

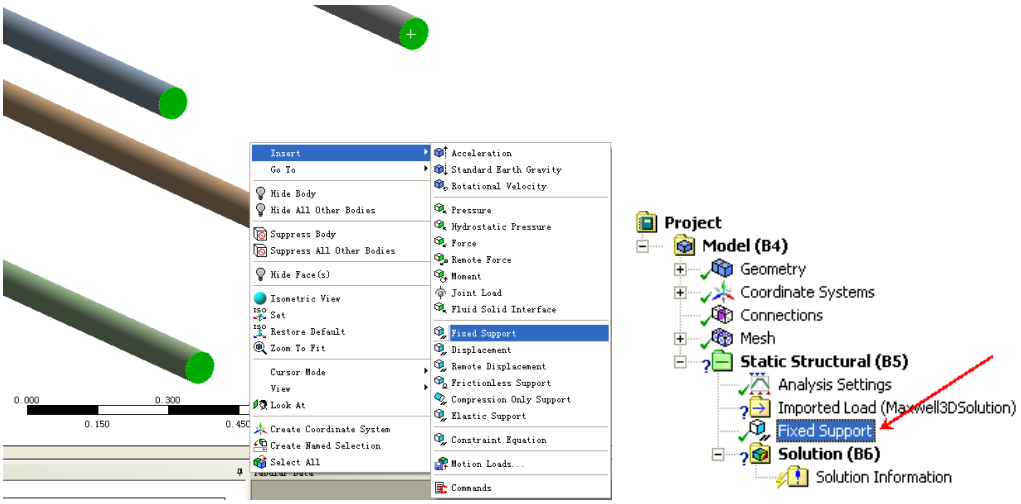
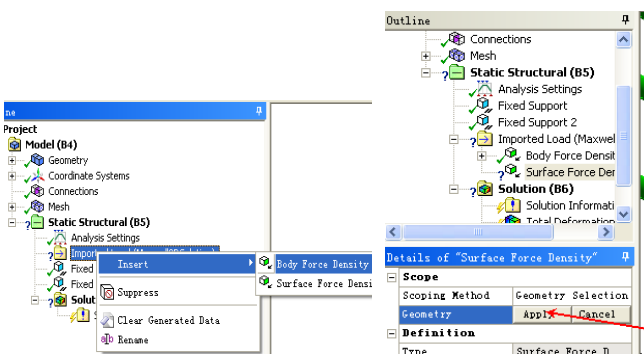


图 15-49　边界条件

Step3：选择如图 15-51 所示绘图区域中的导线模型，单击 Apply 按钮确定。



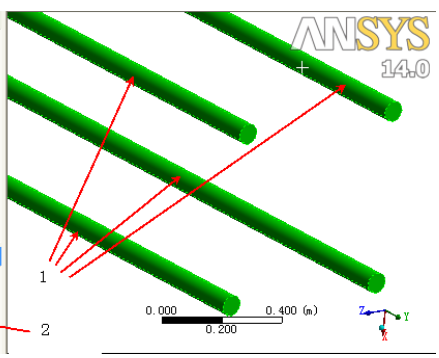
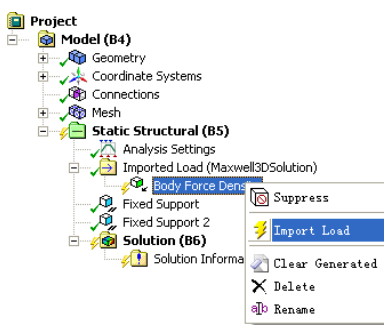


图 15-50　映射力密度　　图 15-51　选择实体

Step4：如图 15-52 所示，选择 Body Force Density 选项并右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Load 命令，经过一段时间计算，映射完后的力密度云图如图 15-53 所示。



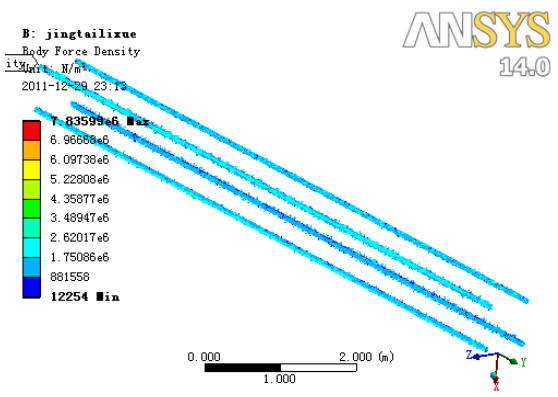


图 15-52　导入载荷　　图 15-53　力密度分布云图

14. 求解计算

求解计算。在 Static Structural（B5）选项上右击，弹出如图 15-54 所示的快捷菜单，在快捷菜单中选择 Solve 命令进行求解计算。

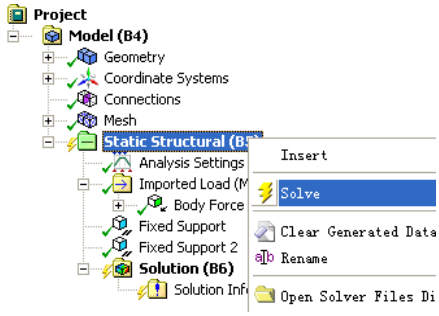


图 15-54　求解计算

15. 后处理

Step1：位移云图。右击 Solution 选项，在弹出如图 15-55 所示的快捷菜单中选择 Insert→Deformation→Total 命令，添加位移云图。

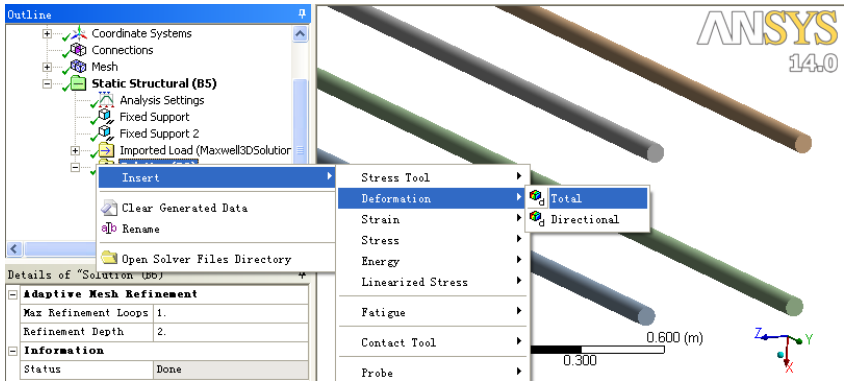


图 15-55　位移云图设置

右击 Total Deformation 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 显示位移云图，将工具栏 Result 0.5 中的数值设置为 0.5，位移云图如图 15-56 所示。

Step2：应力云图。右击 Solution 选项，在弹出如图 15-57 所示的快捷菜单中选择 Insert→Strain→Equivalent（von-Mises）命令，添加应力云图。

右击 Equivalent Stress 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Evaluate All Results 显示应力分布云图，将工具栏 Result 0.5 中的数值设置为 0.5，位移云图如图 15-58 所示。

Step3：保存并退出。单击菜单栏的 Flie 按钮选择 Save Project... 命令，保存，单击按钮退出，并返回 Workbench 窗口。

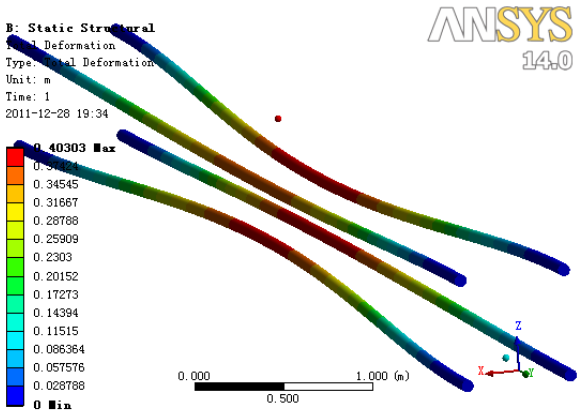


图 15-56　位移云图

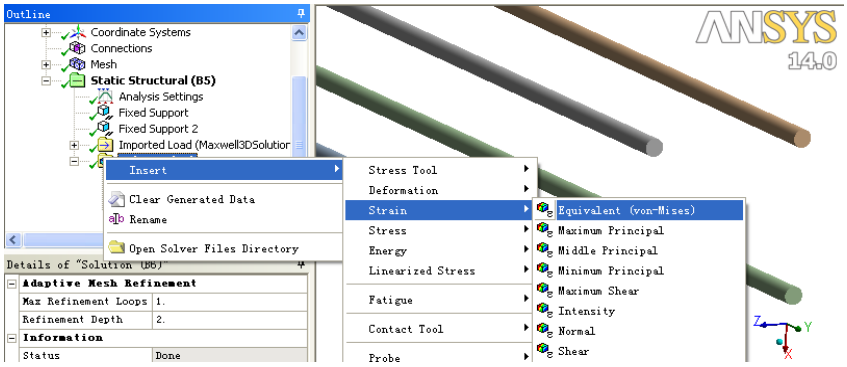


图 15-57　应力云图设置

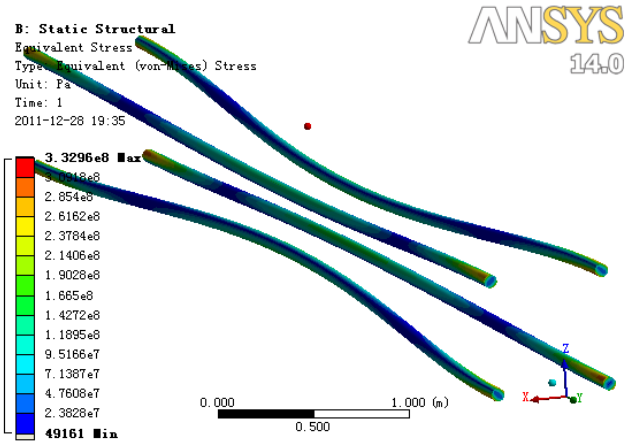


图 15-58　应力云图

16. 保存与退出

返回到 Workbench 窗口，单击 Save 按钮保存文件，然后单击按钮退出。

15.3 项目案例 2——螺线管电磁结构耦合分析

本节主要介绍 ANSYS Workbench 14.0 的电磁场分析模块 Maxwell 的建模方法及求解过程，计算螺线管在通有电流的情况下的变形情况。

学习目标：熟练掌握 Maxwell 的建模方法及求解过程，同时掌握电磁结构耦合分析方法。

模型文件	光盘\model\coil.x_t
结果文件	光盘\example\coil_force.wbpj

1. 问题描述

图 15-59 所示为一个螺线管模型，螺线管通有 5kA 的大电流（如图 15-59 中箭头方向所示），当螺线管进出电流位置固定后，试分析其变形情况及应力分布情况，为了简化分析，此处直接将两端设置成固定约束。

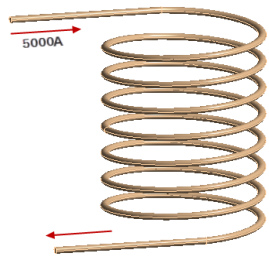


图 15-59 螺线管模型

2. 软件启动与保存

Step1：启动 Workbench。如图 15-60 所示，在 Windows XP 下选择“开始”→“所有程序”→ANSYS 14.0→Workbench 14.0 命令，即可进入 Workbench 主界面。



图 15-60 Workbench 启动方法

Step2：保存工程文档。进入 Workbench 后，单击工具栏中的 Save As... 按钮，将文件保存为 Coil_force，如图 15-61 所示，单击 Getting Started 窗口右上角的（关闭）按钮将其关闭。

注 意

本节算例需要用到 ANSOFT Maxwell15.0 软件，请读者进行安装；

由于 ANSOFT Maxwell 软件不支持保存路径中存在中文名，故在进行文档保存时，保存的路径不能含有中文字符，否则会发生错误。

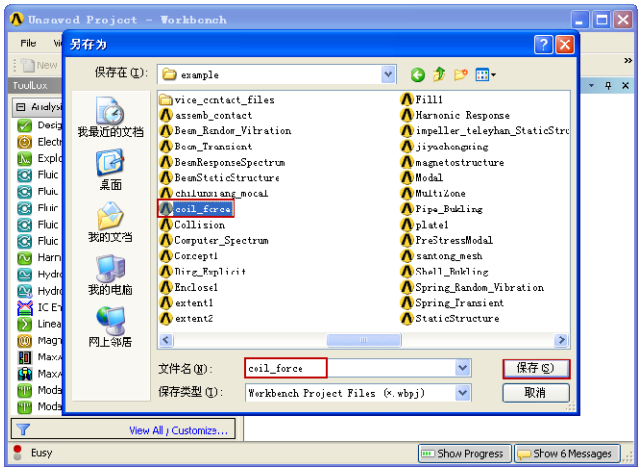


图 15-61　保存工程文档

3. 导入几何数据文件

Step1：创建几何生成器。如图 15-62 所示，在 Workbench 左侧 Toolbox（工具箱）的 Component Systems 中选择 Geometry 选项并按住左键不放将其拖到右侧的 Project Schematic 窗口中，此时即可创建一个如同 EXCEL 表格的几何数据生成器 A。

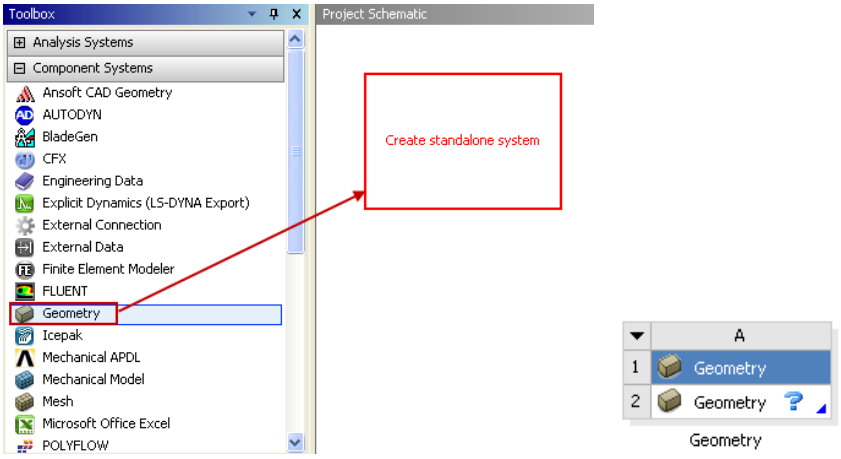


图 15-62　几何生成器

Step2：导入几何数据文件。如图 15-63 所示，在几何数据生成器 A 中的 A2（Geometry）上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，此时会弹出“打开”对话框。

Step3：选择几何数据文件。如图 15-64 所示，在“打开”对话框中做如下操作。

① 在文件类型栏中选择 Parasolid（*.x_t）文件类型；

② 在模型存储文件夹（model）中选择 coil.x_t 几何文件，单击“打开”按钮。

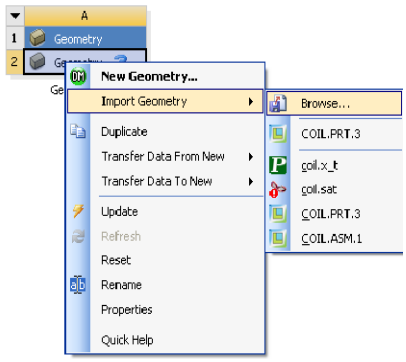


图 15-63　导入外部几何数据

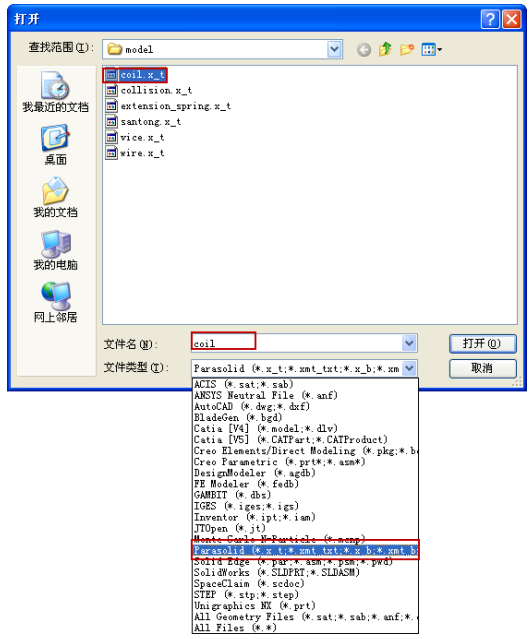


图 15-64　选择几何数据

Step4：如图 15-65 所示，在 Workbench 左侧 Toolbox（工具箱）的 Component Systems 中再次选择 Geometry 选项并按住左键不放将其拖到右侧的 Project Schematic 窗口中，创建几何数据生成器 B。

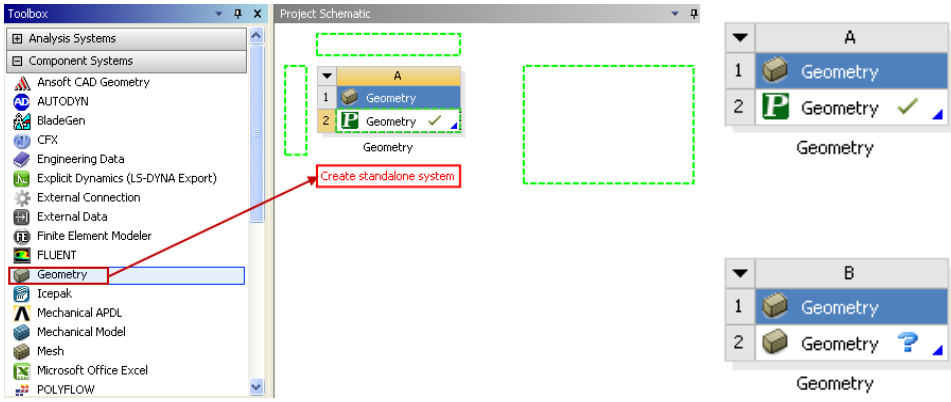


图 15-65　几何数据生成器

Step5：导入几何数据文件。如图 15-66 所示，在几何数据生成器 B 中的 B2（Geometry）上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Geometry→Browse…命令，此时会弹出“打开”对话框。

Step6：选择几何数据文件。如图 15-67 所示，在“打开”对话框中做如下操作。

在模型存储文件夹（model）中选择 air.sat 几何文件，单击“打开”按钮。

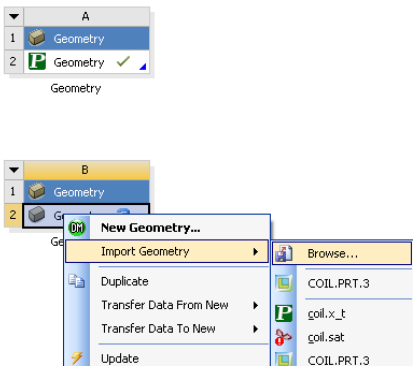


图 15-66　导入外部几何数据

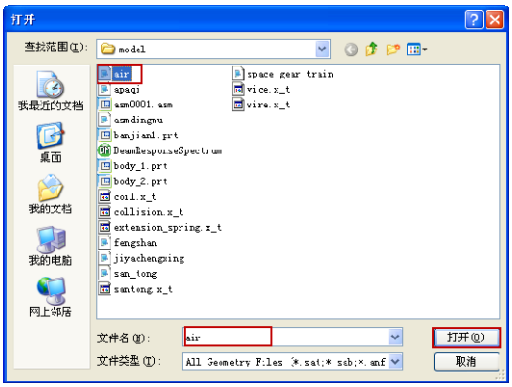


图 15-67　选择几何数据

Step7：如图 15-68 所示，为读取完几何的两个项目，两种文件格式的图标略有不同。

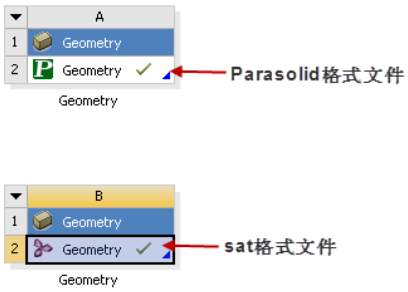


图 15-68　项目

4. 建立电磁分析与数据读取

Step1：创建电磁场分析。在 Workbench 左侧 Toolbox（工具箱）的 Analysis Systems 中选择 Maxwell 3D 选项并按住左键不放将其拖到右侧的 Project Schematic 窗口中，此时即可创建一个如同 EXCEL 表格的工程分析流程表 B，如图 15-69 所示。

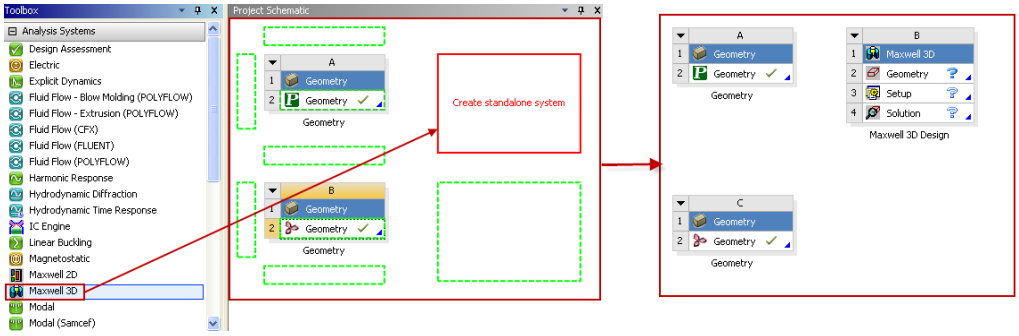


图 15-69　创建电磁分析环境

Step2：共享数据。选择 A2（Geometry）选项不放直接拖曳到项目 B 的 B2 表格中，如图 15-70 所示，此时 B2 表格后面的提示符由 变成 ，同时 Maxwell 3D 软件会自动启动。

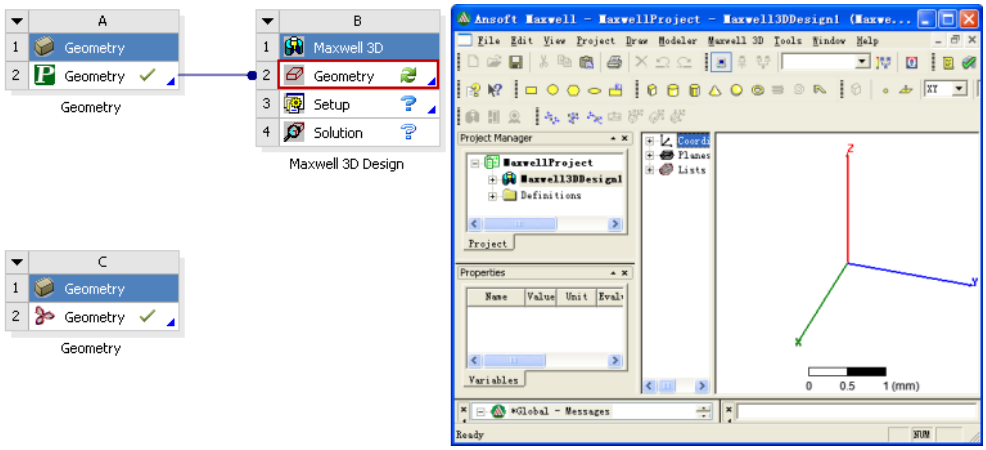


图 15-70　几何数据共享

Step3：如图 15-71 所示，右击 B2 表格，在弹出的快捷菜单中选择 Refresh 命令。

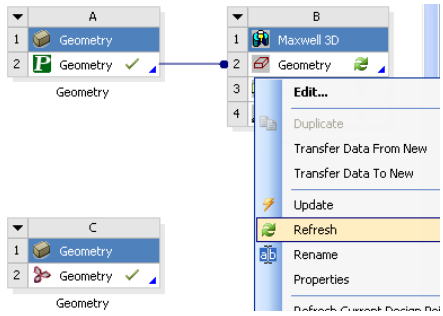


图 15-71　读入模型数据文件

Step4：此时模型文件已经成功显示在 Maxwell 软件中，如图 15-72 所示。

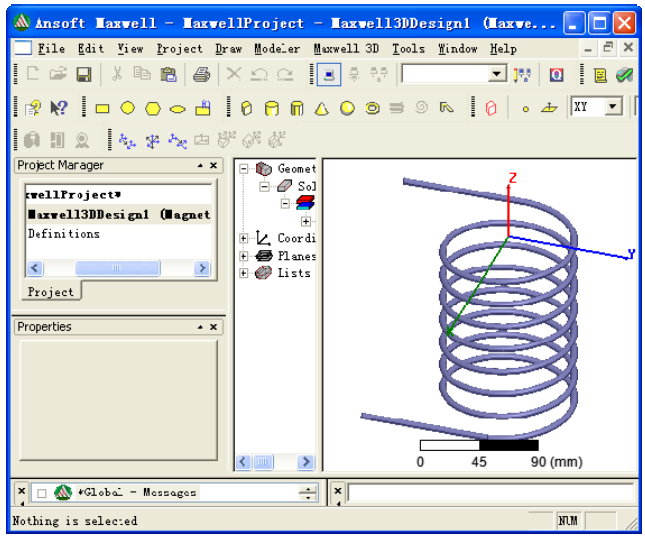


图 15-72　读取的模型

Step5：同样操作，选择 C2（Geometry）选项不放直接拖曳到项目 B 的 B2 表格中，如图 15-73 所示，此时 B2 表格后面的提示符由 变成 。

Step6：如图 15-74 所示，右击 B2 表格，在弹出的快捷菜单中选择 Refresh 命令。

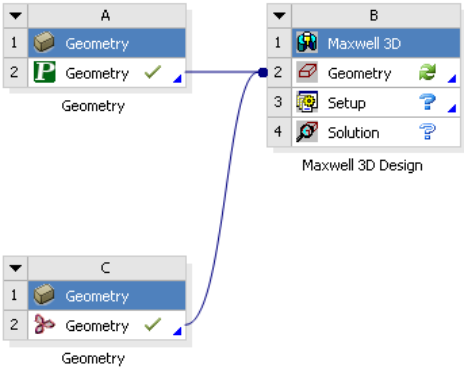


图 15-73　几何数据共享

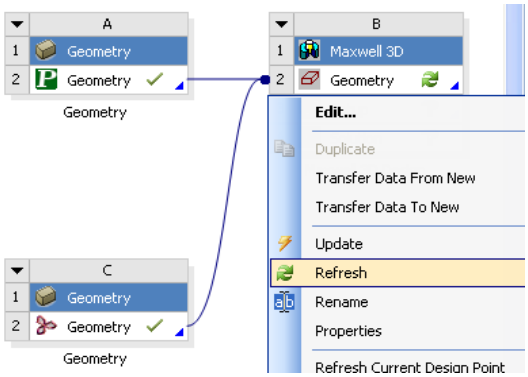


图 15-74　读入模型数据文件

Step7：此时模型文件已经成功显示在 Maxwell 软件中，如图 15-75 所示。

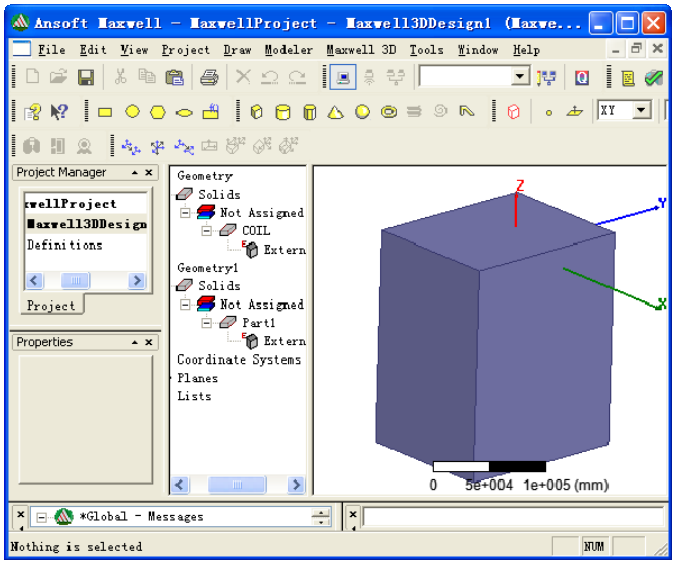


图 15-75　读取的模型

Step8：模型检查。经检查发现在 Workbench 平台的下方弹出一个警告信息，如图 15-76 所示，此信息表明导入到 Maxwell 软件的几何尺寸超出预期范围。

Step9：模型调整。如图 15-77 所示，在 Maxwell 软件中选中外面的长方体几何（air.sat），右击在弹出的快捷菜单中选择 Edit→Scale 命令。

Step10：模型调整。如图 15-78 所示，在弹出的对话框中输入三个方向的比例均为 0.001，单击 OK 按钮。

Step11：单击工具栏中的 按钮，此时两个几何文件同时显示出来，如图 15-79 所示。

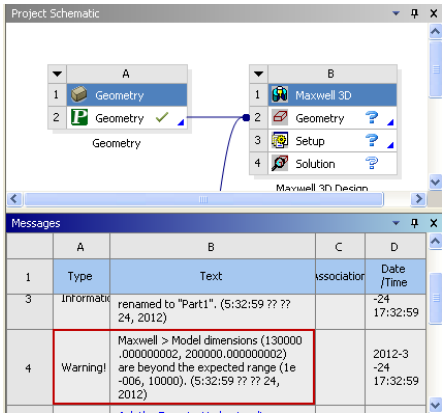


图 15-76　模型检查

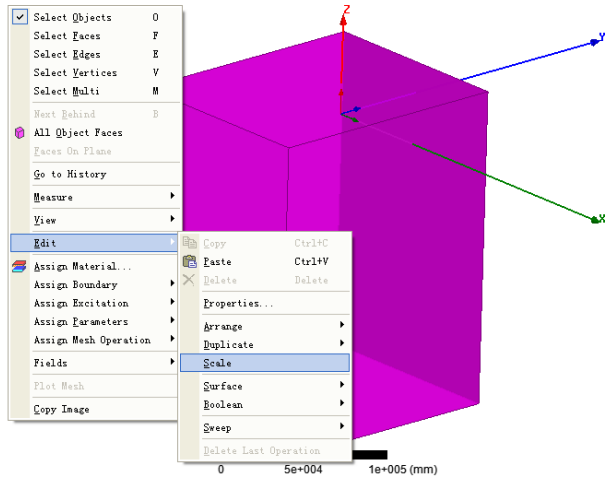


图 15-77　模型调整

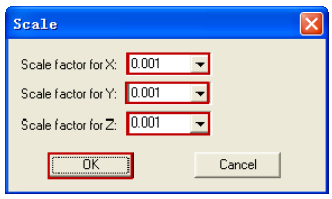


图 15-78　调整模型比例

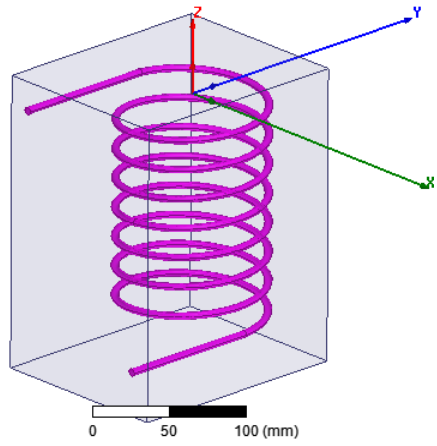


图 15-79　模型

5. 求解器与求解域的设置

Step1：设置求解器类型。如图 15-80 所示，选择菜单栏中的 Maxwell 3D→Solution Type…命令。

Step2：在弹出如图 15-81 所示的“Solution Type”对话框中选择 Magnetostatic（静态磁场分析）选项，单击 OK 按钮，关闭“Solution Type”的对话框。

6. 赋予材料属性

Step1：赋予材料属性。在模型树中选择 COIL 模型名，右击后在弹出的快捷菜单中选择 Assign Material…命令，如图 15-82 所示，此时会弹出“Select Definition”对话框。

Step2：在如图 15-83 所示的“Select Definition”对话框中选择 Aluminum 材料并单击“确定”按钮，此时模型树中四个导线的上级菜单由 Not Assigned 变成 Aluminum，求解域默认为真空 Vacuum。

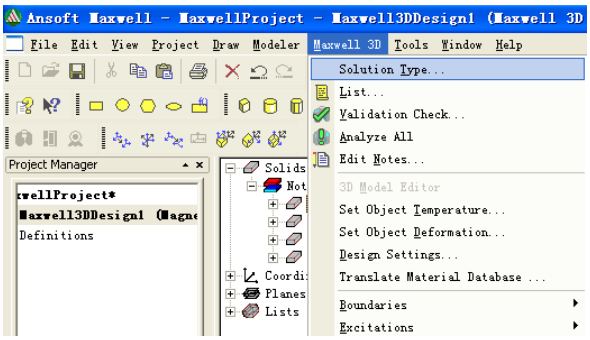


图 15-80　设置求解器类型

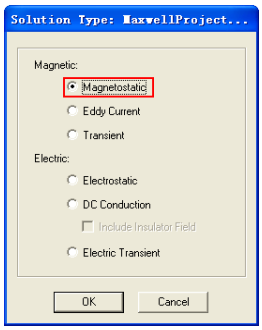


图 15-81　“Solution Type”对话框

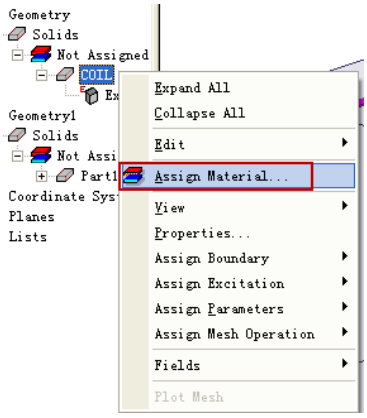


图 15-82　赋予材料属性

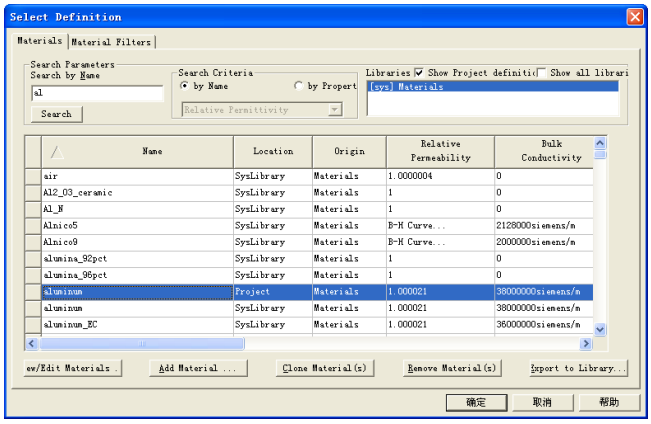


图 15-83　“Select Definition”对话框

Step3：同样，如图 15-84 所示，将 Part1 模型设置为 Vacuum。

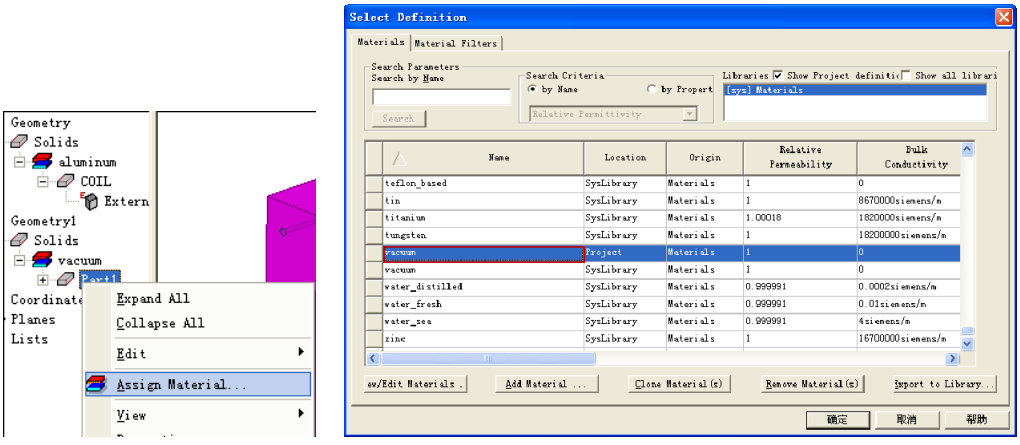


图 15-84　材料库

7. 添加激励

Step1：创建激励。单击键盘 f 键，然后单击如图 15-85 所示的一个端面，右击后在

弹出的快捷菜单中选择 Assign Excitation→Current…命令。

Step2：此时会弹出如图 15-86 所示“Current Excitation”对话框，在该对话框的 Value 中输入 5，并将单位设置成 kA，单击 OK 按钮，完成参数的设置。

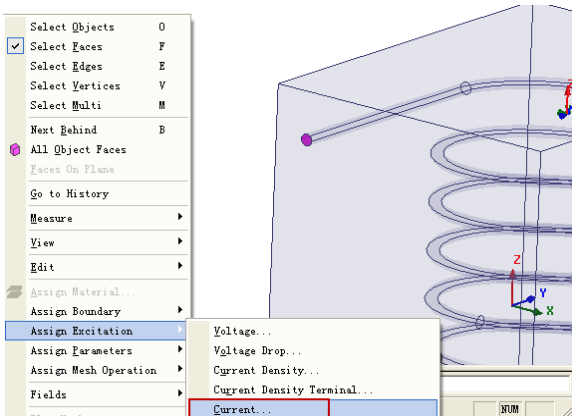


图 15-85　创建激励

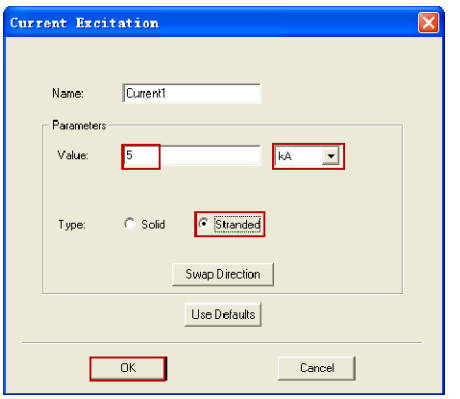


图 15-86　“Current Excitation”对话框

Step3：同样，将螺线管另外一个端面也设置为 5kA 的电流，与上面操作步骤不同之处为此处的电流方向设置为自里向外的，如图 15-87 所示，此时只需单击 Swap Direction 按钮即可完成相应的操作。

Step4：右击 Project Manager→Analysis 命令，如图 15-88 所示，在弹出的快捷菜单中选择 Add Solution Setup…命令，添加求解器。

Step5：此时弹出如图 15-89 所示“求解器设置”对话框，保持默认设置，单击“确定”按钮。

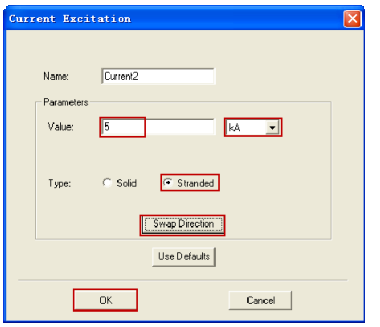


图 15-87　设置激励

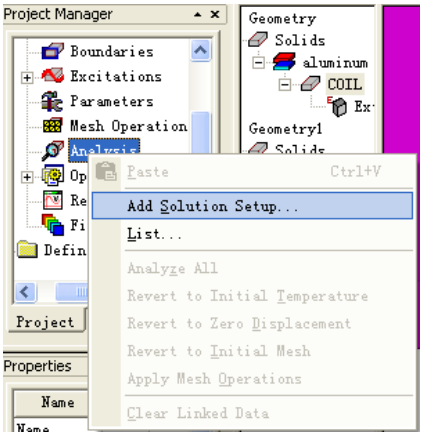


图 15-88　添加求解器

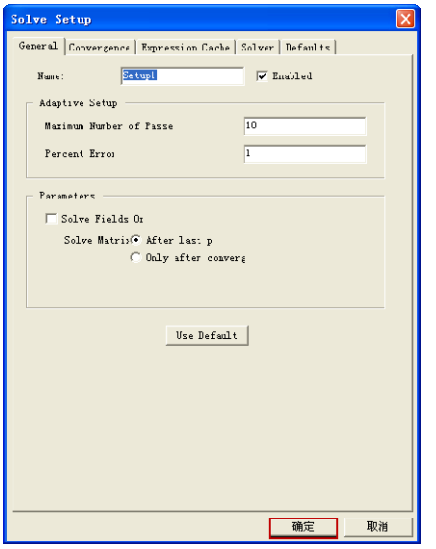


图 15-89　求解器设置

8. 模型检查与计算

通过上面的操作步骤，有限元分析的前处理工作全部结束，为了保证求解能顺利完成计算，需要先检查一下前处理的所有操作是否正确。

Step1：模型检查。单击工具栏上的按钮出现如图 15-90 所示的“Validation Check”对话框，对号说明前面的基本操作步骤没有问题。

注 意

如果出现了，说明前处理过程中某些步骤有问题，请根据右侧的提示信息进行检查。

Step2：求解计算。右击 Project Manager 中的 Analysis→Setup1 命令，在弹出的快捷菜单中选择如图 15-91 所示的 Analyze 命令，进行求解计算，求解需要一定的时间。

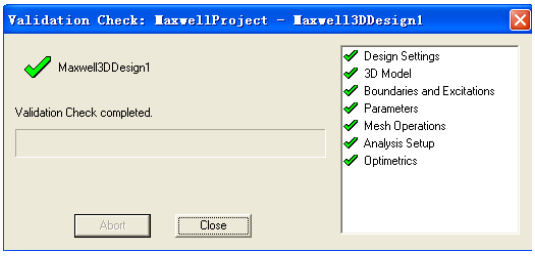


图 15-90 “Validation Check”对话框

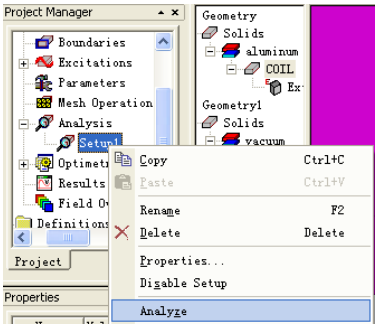


图 15-91 求解模型

9. 后处理

Step1：后处理操作。求解完成后，选中螺线管模型，右击后在弹出的如图 15-92 所示的快捷菜单中选择 Field→Other→Volme_Force_Density 命令，此时将弹出 Create Field Plot 对话框。

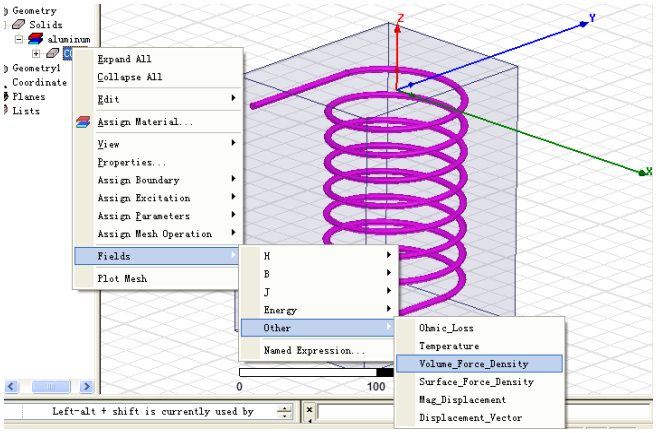


图 15-92 后处理操作

Step2：在弹出的如图 15-93 所示的“Create Field Plot”对话框中的 Quantity 中选择 Volme_Force_Density 选项，在 In Volume 中选择螺线管。体积力密度云图如图 15-94 所示。

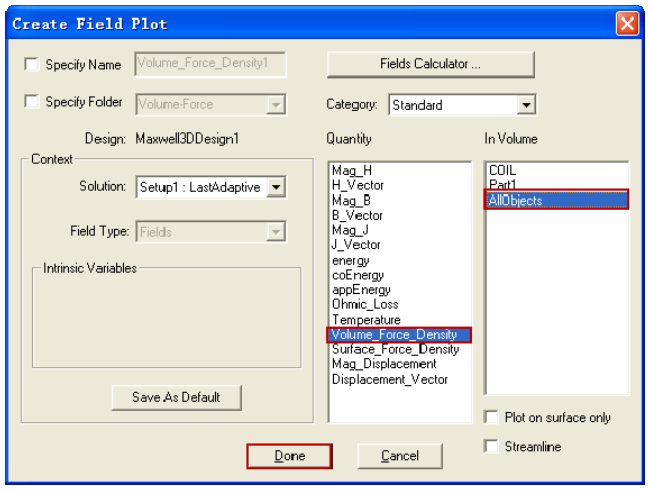


图 15-93　“Create Field Plot”对话框

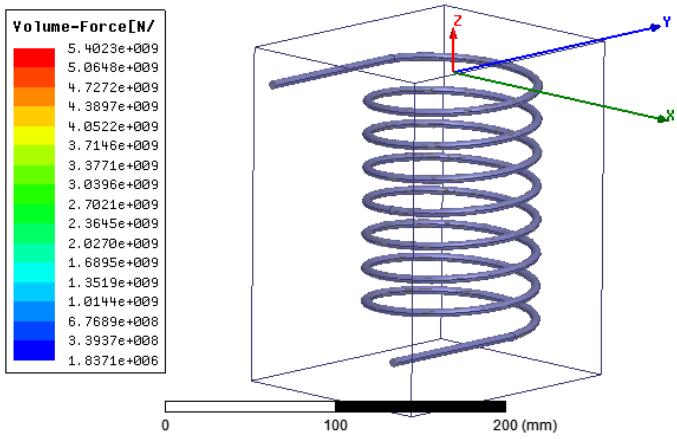


图 15-94　体积力密度云图

Step3：单击按钮，保存文档，然后单击按钮关闭 Maxwell 3D 软件，返回 Workbench 主窗口。

10. 创建力学分析和数据共享

Step1：回到 Workbench 窗口中，在如图 15-95 所示的表格 B4（Solution）上右击，在弹出的快捷菜单中选择 Transfer Data To New→Static Structural 命令，此时会在 B 表的右侧出现一个 C 表，同时出现 B4 与 C5 连接曲线，这说明 B4 的结果数据可以作为 C5 的外载荷使用。

Step2：共享几何模型数据。选择如图 15-96 所示的 A2（Geometry）选项不放直接拖曳到 C3（Geometry）中。

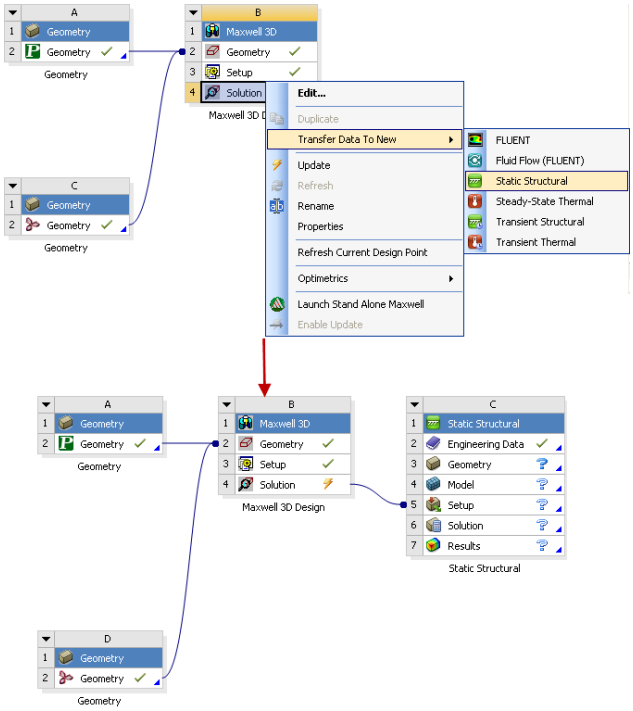


图 15-95　创建耦合的静力分析模型

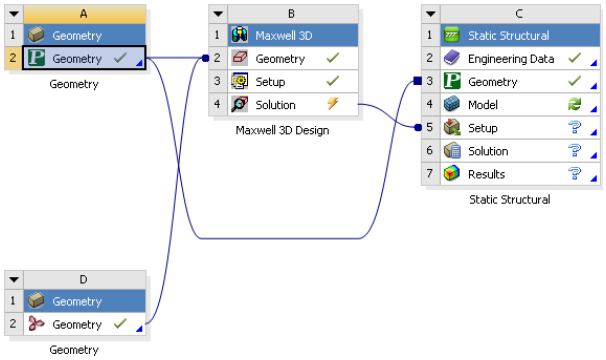


图 15-96　共享几何模型数据

Step3：体积力密度数据传递。在 Workbench 主窗口 B4（Solution）中右击，在弹出的快捷菜单中选择 Update 命令，经过数分钟的计算，B4（Solution）表格由⚡变成✓，如图 15-97 所示，说明 B4 数据已经更新完成。

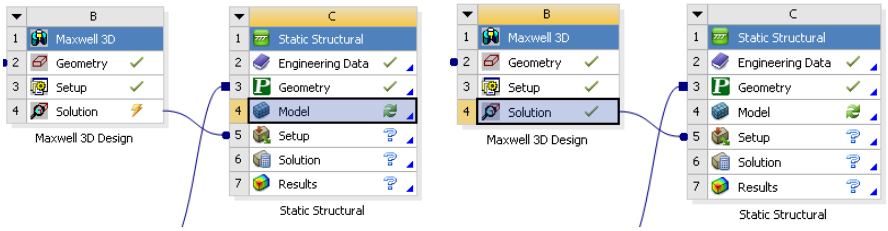


图 15-97　数据传递

11. 材料设定

Step1：材料属性设定。在 C2（Engineering Data）中右击，在弹出的快捷菜单中选择 Edit…命令，单击如图 15-98 所示工具栏上的按钮。

Step2：进入如图 15-99 所示材料库，选择 General Materials→Aluminum Alloy 命令，设定完成后单击Return to Project按钮切换到工程界面下。

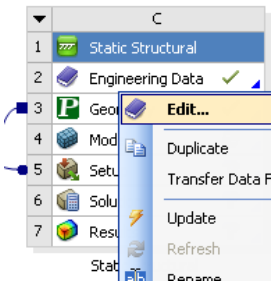


图 15-98　材料属性设定

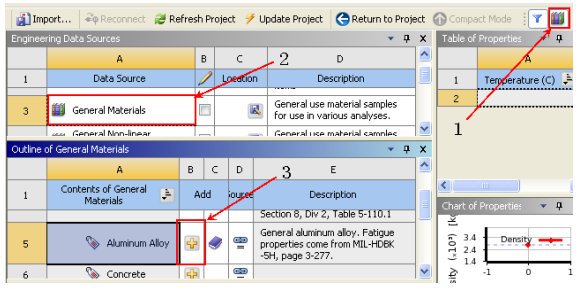


图 15-99　材料选择

Step3：Mechanical 中的模型。在 C4（Model）中右击，在弹出如图 15-100 所示的快捷菜单中选择 Edit…命令，进入如图 15-101 所示的 Mechanical 操作界面。

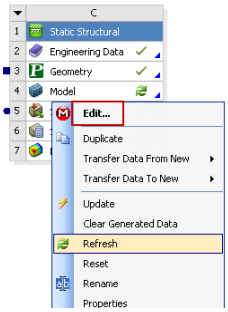


图 15-100　编辑 Mechanical

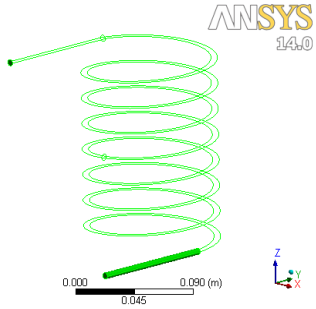


图 15-101　Mechanical 中模型

Step4：赋予材料属性。选择如图 15-102 所示 Outline 中 Model（C4）→Geometry 里面的 COIL，在下面的 Details of “COIL”中的 Material→Assignment 中选择 Aluminum Alloy 选项。

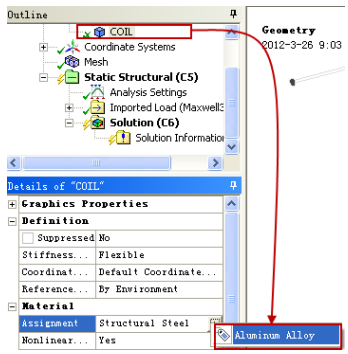


图 15-102　赋予材料属性

12. 网格划分

Step1：网格设置。在 Project→Model（B4）→Mesh 命令上右击，在弹出如图 15-103 所示的快捷菜单中选择 Insert→Method 命令。



图 15-103　插入网格划分方式

Step2：如图 15-104 所示，选中里面的螺线管，选择 Details of “Sweep Method”中的 Method→Sweep 选项，在 Free Face Mesh Type 中选择 All Quard 选项，在 Type 中选择 Element Size 选项，在 Sweep Element Size 中输入 2.e-002m。

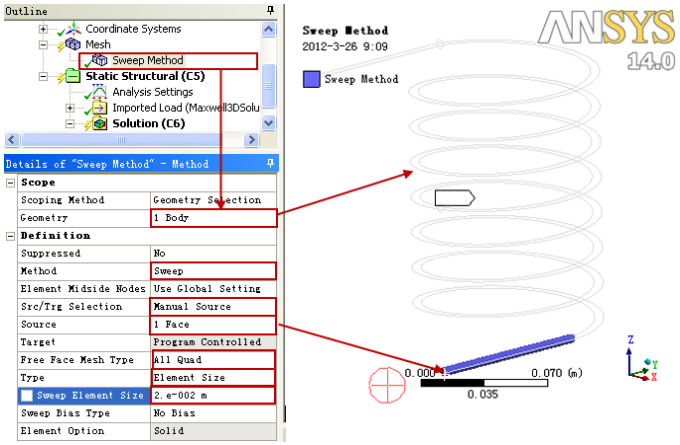


图 15-104　网格扫描剖分设置

注：本算例将网格划分得较粗糙，实际工程中需要对网格进行细化，本算例只演示网格划分过程。

Step3：如图 15-105 所示，右击 Mesh 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Generate Mesh 命令。

Step4：划分完成的网格如图 15-106 所示。

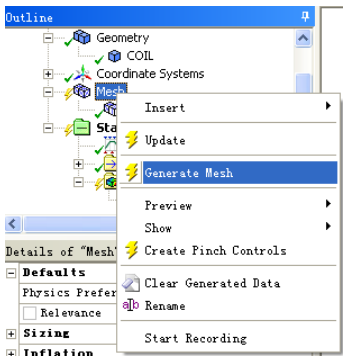


图 15-105　执行网格计算

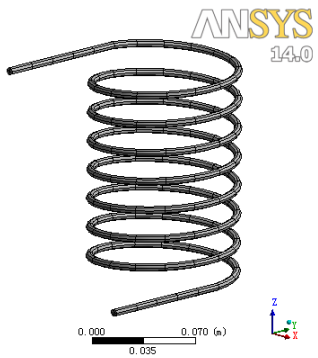


图 15-106　网格生成

13. 添加边界条件与映射激励

Step1：添加边界条件。添加一个 Fixed Support 命令，在如图 15-107 所示 Details of “Fixed Support”面板中的 Geornetry 中确保线圈的两个端面被选中。

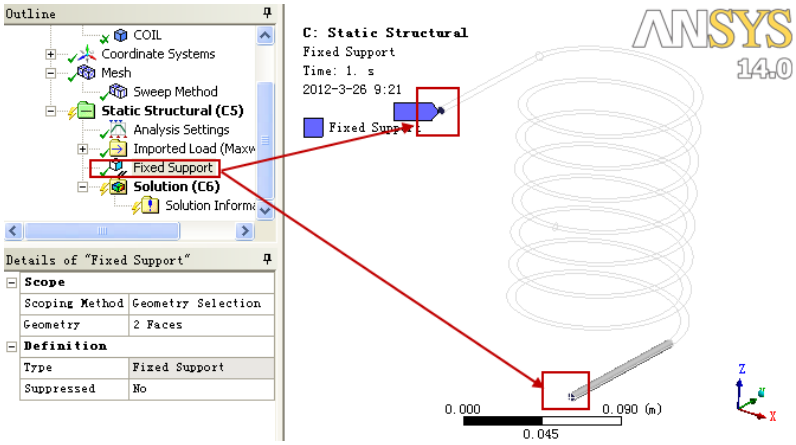


图 15-107　边界条件

Step2：映射力密度到结构网格上。右击 Static Structural（B5）下面的 Import Load 选项弹出快捷菜单，在如图 15-108 所示的快捷菜单中选择 Insert→Body Force Density 命令。

Step3：选择如图 15-109 所示绘图区域中的螺线管模型，单击 Apply 按钮确定。

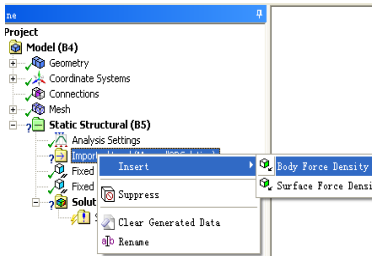


图 15-108　映射力密度

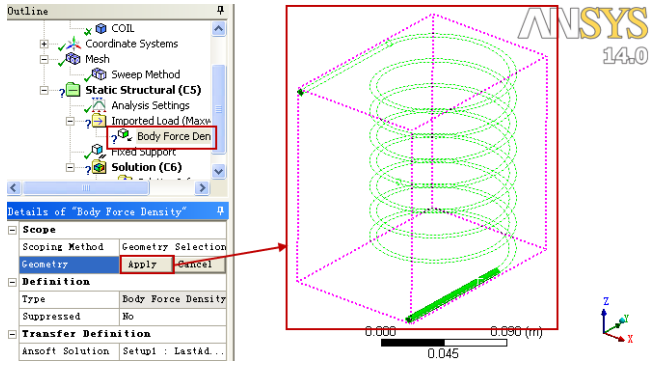


图 15-109　选择实体

Step4：如图 15-110 所示，选择 Static Structural 下面的 Import Load 选项并右击，在弹出的快捷菜单中选择 Import Load 命令，经过一段时间计算，映射完后的力密度云图如图 15-111 所示。

14. 求解计算

求解计算。在 Static Structural（C5）选项上右击，弹出如图 15-112 所示的快捷菜单，在快捷菜单中选择 Solve 命令进行求解计算。

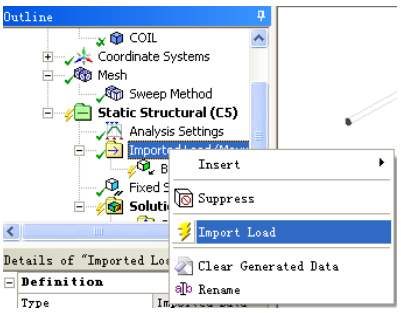


图 15-110　导入载荷

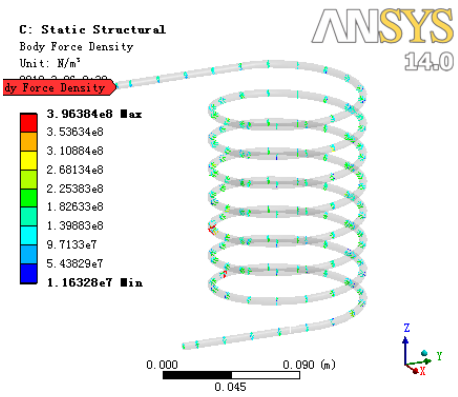


图 15-111　力密度分布云图

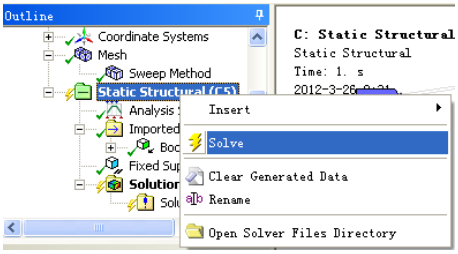


图 15-112　求解计算

15. 后处理

Step1：位移云图。右击 Solution 选项，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→ Deformation →Total 命令，添加位移云图，然后执行计算即可得到如图 15-113 所示的位移响应云图。

Step2：应力云图。用同样方式可以得到应力分布云图，如图 15-114 所示。

Step3：保存并退出。单击菜单栏的 Flie 按钮选择 Save Project... 命令，保存，单击按钮退出，并返回 Workbench 窗口。

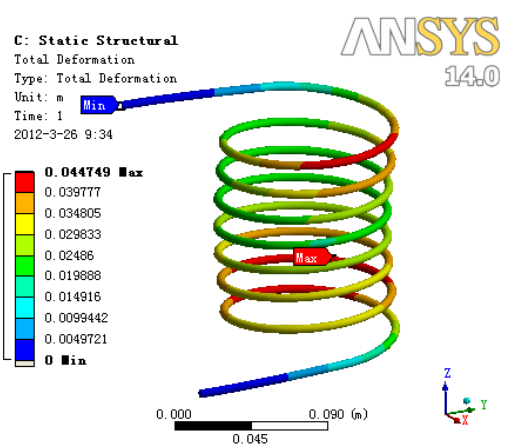


图 15-113　位移云图

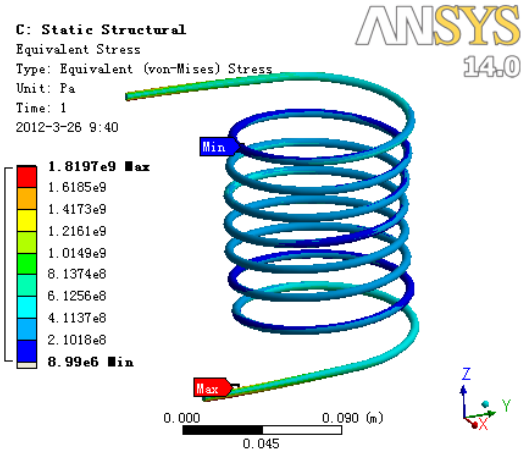


图 15-114　应力云图

16. 保存与退出

返回 Workbench 窗口，单击

按钮保存文件，然后单击按钮退出。

15.4 本章小结

本章节通过两个典型实例，针对于电磁场力问题进行了详细的讲解，讲解了 ANSYS Workbench 中的 Maxwell 电磁计算模块的模型导入、电流的施加、求解域的设置，即如何将体积力密度值导入到 Mechnacial 平台中进行电磁力分析，同时得到云图。

ANSYS Workbench 平台除了可以进行电磁场力计算外，还可以进行电磁热耦合计算，其操作方法与电磁结构耦合相似，请读者自己练习。通过本章节的学习，读者应该对电磁结构耦合分析的过程有详细的了解。